

**MODULO DIDÁCTICO Y OPERATIVO PARA LA ELABORACIÓN DE
ESQUEMAS DE DEVANADO EN MÁQUINAS ROTATIVAS TRIFÁSICAS DE
CORRIENTE ALTERNA.**

MAURICIO HIDROBO ENRIQUEZ

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2013**

**MODULO DIDÁCTICO Y OPERATIVO PARA LA ELABORACIÓN DE
ESQUEMAS DE DEVANADO EN MÁQUINAS ROTATIVAS TRIFÁSICAS DE
CORRIENTE ALTERNA.**

MAURICIO HIDROBO ENRIQUEZ

**Proyecto de grado para optar el título de
Ingeniero Electricista**

**Director
PAUL ANDRES MANRIQUE
Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA Y MECÁNICA
PROGRAMA INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2013**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de

ENRIQUE QUISPE

Jurado

SANDRA MILENA LONDOÑO

Jurado

Santiago de Cali, 24 de Noviembre de 2013

CONTENIDO	Pág.
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	13
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVO GENERAL	15
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4. MARCO REFERENCIAL	16
4.1. PRINCIPIOS GENERALES DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS	16
4.1.1. Generador.	16
4.1.2. Motor.	16
4.1.3. Transformador	16
4.2. ELEMENTOS BÁSICOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS	17
4.3. DEFINICIONES PARA DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA	18
4.5. NÚMERO DE RANURAS POR POLO Y FASE (K_{pq})	20
4.5 NÚMERO TOTAL DE BOBINAS (B) Y DE BOBINAS POR GRUPO (U_g)	21
4.6 DISTANCIA ENTRE PRINCIPIOS DE FASES (Y_q). ANGULO ELÉCTRICO.	23
5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DEVANADOS EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS	25
5.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR ASINCRONO	27
5.2 CONSTITUCIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONICO O DE INDUCCIÓN	28
5.3 MOTOR ASINCRONO TRIFASICO	29
5.4. CAMPO MAGNETICO GIRATORIO	30

5.5 VELOCIDAD DE LOS MOTORES ASINCRONOS	32
5.6 PAR DE ARRANQUE	33
5.7 TIPOS DE ROTOR EN MOTORES ASINCRONOS DE CORRIENTE ALTERNA	34
5.8 ROTOR DE JAULA DE ARDILLA (resistencia elevada)	34
5.9 FACTOR DEL DEVANADO	35
5.10 INTERVALOS DE VARIACION	38
6. METODOLOGÍA	40
7. METODOS DE CÁLCULO PARA MOTORES TRIFASICOS	41
7.1. INTRODUCCIÓN	41
7.2. CÁLCULO DEL ÁREA DE LOS DIENTES Y DE LA CULATA	41
7.3 DENSIDADES DE FLUJO	42
7.4 FLUJO POR POLO	44
7.5 TIPO DE DEVANADO	45
7.6 CÁLCULO DEL NÚMERO DE BOBINAS POR GRUPO DE POLO	46
7.7 FACTORES DE DEVANADO	47
7.7.1. Devanados de doble capa	47
7.8 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN	48
7.8.1. Devanados enteros de doble capa	48
7.8.2. Devanados de simple capa.	48
7.9 TIPO DE CONEXIÓN	49
7.10 CÁLCULO DE NÚMERO DE VUELTAS POR FASE	49
7.11 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS POR BOBINA	49
7.12 CÁLCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR	50
7.12.1. Devanados con conductores redondos.	51
7.13 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CONDUCTORES POR RANURAS	51
8. CÁLCULO DEVANADO MOTOR SIEMENS PARA 2 POLOS 3600 R.P.M	57
8.1. FACTOR DE PASO PARA MAQUINAS DE 2 POLOS	61
8.1.1. Cálculo del calibre del conductor.	63
8.2. FACTOR DE ESPACIAMIENTO / CALIBRE DEL CONDUCTOR	63
8.3. CÁLCULO DEVANADO MOTOR SIEMENS PARA 4 POLOS 1800 R.P.M	64
8.3.1. Cálculo del calibre del conductor. Número de conductores por ranura.	68

8.4. FACTOR DE ESPACIAMIENTO / CALIBRE DEL CONDUCTOR	69
8.5. CALCULO PARA MOTOR DE 6 POLOS 1200 RPM	70
8.5.1. Calculo del número de bobinas por grupo de polo	72
8.6. FACTOR DE PASO PARA MAQUINAS DE 2 POLOS	73
8.6.1. Cálculo del calibre del conductor. Número de conductores por ranura.	74
8.7. FACTOR DE ESPACIAMIENTO / CALIBRE DEL CONDUCTOR	75
9. IMPLEMENTACIÓN FINAL DEL MÓDULO DIDÁCTICO Y OPERATIVO PARA LA ELABORACIÓN DE ESQUEMAS DE DEVANADOS EN MÁQUINAS ROTATIVAS TRIFÁSICAS DE CORRIENTE ALTERNA	77
10. MANUAL DE LABORATORIO PARA LA PRÁCTICA DE DEVANADOS	78
10.1. COMPETENCIA ACADEMICA	78
10.2. ALCANCE	78
10.3. OBJETIVOS	78
10.4. EQUIPOS A UTILIZAR	78
10.5. FUNDAMENTOS TEORICOS	79
10.5.1. Principios de las maquinas eléctricas.	79
10.5.1.1. Motor.	79
10.6. DEFINICIONES PARA DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA	79
10.7. GRUPOS DE BOBINAS POR FASE (Gf) Y NÚMERO TOTAL DE GRUPOS (G)	80
10.8. NÚMERO DE RANURAS POR POLO Y FASE (Kpq)	81
10.9. NÚMERO TOTAL DE BOBINAS (B) Y DE BOBINAS POR GRUPO (Ug)	82
10.9.1. Procedimiento	84
11. CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	86
ANEXOS	88

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Motor trifásico de inducción.	18
Figura 2. Principio de ejecución de los devanados por polo y por Polos consecuentes.	19
Figura 3. Representación esquemática de devanados.	26
Figura 4. Principio de funcionamiento del motor asíncrono.	27
Figura 5. Motor de inducción bipolar.	29
Figura 6. Esquema sinoidal a 120 ° eléctricos.	31
Figura 7. Campo giratorio de un motor asíncrono trifásico de Corriente alterna.	31
Figura 8. Foto motor elaboración propia.	40
Figura 9. Dimensiones de estructura ferromagnética.	42
Figura 10. Coeficiente de caída de impedancia en el devanado del estator.	50
Figura 11. Dimensiones de las ranuras.	51
Figura 12. Factores para espaciado para devanados de doble capa con Conductores esmaltados en ranuras trapezoidales.	53
Figura 13. Datos placa motor.	57
Figura 14. Longitud axial del motor siemens.	57
Figura 15. Altura del estator del motor siemens.	57
Figura 16. Diámetro exterior del motor siemens.	58
Figura 17. Fotos bornero motor y modulo didáctico.	77
Figura 18. Principio de ejecución de los devanados por polo y por polos consecuentes.	80

LISTADO DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Numero de ranuras por polo.	21
Cuadro 2. Valores recomendados de inducción (T) en los dientes.	43
Cuadro 3. Valores recomendados de inducción (T) en la culata.	44
Cuadro 4. Características de los conductores.	55
Cuadro 5. Intercepto y pendientes para las características y factores De espaciamiento (ranuras trapezoidales).	56
Cuadro 6. Numero de ranuras por polo y fase, para un motor trifásico	82

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXOS 1 PLANO A 2	88
ANEXOS 1 PLANO B 4	89
ANEXOS 1 PLANO C 6	90

RESUMEN

El siguiente documento se presenta como trabajo de grado en el cual se pretende brindar una herramienta para la elaboración de esquemas de devanado imbricados de paso entero en máquinas rotativas trifásicas de corriente alterna, llevando a cabo la construcción de un módulo didáctico y operativo con su respectiva guía, en el cual los estudiantes de la Universidad Autónoma de Occidente pertenecientes al programa de Ingeniería Eléctrica, puedan fortalecer el contenido temático de los cursos de Conversión de la Energía.

El proyecto tiene como objetivo analizar y evaluar el comportamiento de una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna mediante la utilización de devanados. Para ello se realizará la implementación sobre una máquina trifásica de inducción de 36 ranuras la cual permite esquemas de devanados de 2, 4 y 6 polos, en una o dos capas, que se conectarán a un bornero de conexión donde el alumno puede hacer sus diferentes tipos de ejercicios y aplicar los tipos de devanados según la configuración y paso. Para tal efecto se dispondrá del laboratorio de la facultad de Ingeniería Eléctrica para realizar pruebas y ensayos en la plataforma didáctica de devanados en motores asincrónicos trifásicos de corriente alterna, y se contará con la dirección del ingeniero electricista Paul Andrés Manrique, con el fin de verificar si lo realizado en la plataforma didáctica.

Palabras clave: ingeniería eléctrica, devanados, máquinas rotativas, corriente alterna, inducción, polos.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo sucesivo de la economía nacional del país prevé la utilización más amplia de la energía eléctrica, así como el incremento rápido de la fabricación de máquinas eléctricas en Colombia.

Toda la experiencia de la explotación de máquinas eléctricas confirma el hecho de que su parte más vulnerable la constituyen los devanados a los que corresponden más del 70% de todos los gastos del trabajo de reparación, mantenimiento y rebobinado de las mismas, tanto en el ámbito comercial como en el industrial. Por lo tanto, el problema de la instrucción de especialistas de alta calificación en la ejecución y práctica de devanados en las máquinas eléctricas constituye una tarea en la que se requieren expertos que posean amplios conocimientos teóricos y hábitos prácticos, referencia Fernando Martínez Domínguez.

De esta manera surge la idea para que la Universidad Autónoma de Occidente cuente en sus laboratorios con una plataforma para realizar la práctica de devanados, donde el estudiante pueda aplicar los conocimientos adquiridos en los cursos de Conversión de la Energía y así adquieran experiencias prácticas que permitan un mejor desarrollo en su vida laboral como ingeniero electricista, y pueda competir con profesionales egresados de cualquier universidad o instituto de educación superior a nivel nacional e internacional, ya que a medida que avanza nuestro proyecto de grado, hemos encontrado algunos antecedentes de plataformas existentes como la de Optisigma en Brasil, y la que actualmente se encuentra en la facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle.

Es por esto que la propuesta implica el desarrollo de una plataforma didáctica y operativa para la elaboración de devanados de paso entero en máquinas eléctricas rotativas, incluyendo fundamentos teóricos y las herramientas necesarias para el adecuado uso de la plataforma, mediante la utilización de devanados, y comprender la estructura constructiva de los mismos. Además de describir los procedimientos necesarios en la composición de devanados de paso entero.

Para el alcance de los objetivos propuestos se desarrolló una serie de actividades que inicia buscando teorías de devanados en diferentes bibliografías, clasificando el mismo lenguaje y simbología dependiendo de los autores encontrados; especificando la formulación para desarrollar los esquemas de devanados en planos esquemáticos. Posteriormente con la consecución y adaptación de un motor trifásico de 36 ranuras que permite esquemas de devanados de 2, 4 y 6

polos, como pieza fundamental para la implementación de la plataforma, para después proceder a calcular los parámetros para el diseño de los devanados y su elaboración. Dichos parámetros consisten en el cálculo del calibre del alambre, establecer el paso de las bobinas, se debe construir un bornero que permita el cierre de las bobinas para su número de polos que van directamente proporcional con las RPM de la máquina, al final de este cierre se hace una conexión en estrella o en triángulo según sea su tensión, con verificación de los polos y las RPM medidas en el eje del rotor.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Universidad Autónoma de Occidente no posee en sus laboratorios una máquina para realizar la práctica de devanados donde el estudiante pueda aplicar los conocimientos adquiridos en los cursos de conversión de la energía, para el desarrollo de esquemas de devanados en máquinas eléctricas asincrónicas rotativas de corriente alterna. Con el desarrollo de este proyecto y construcción de la máquina se busca contribuir con una metodología de enseñanza para la confección de devanados imbricados trifásicos de máquinas eléctricas asincrónicas rotativas de corriente alterna.

La Universidad Autónoma de Occidente no posee en sus laboratorios una máquina para realizar la práctica de devanados.

Si tenemos la máquina podemos aplicar la metodología de enseñanza para la elaboración de devanados imbricados trifásicos de máquinas eléctricas asincrónicas rotativas de corriente alterna.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo el estudiante puede aplicar los conocimientos adquiridos en los cursos de conversión de la energía, para el desarrollo de esquemas de devanados en máquinas eléctricas asincrónicas rotativas de corriente alterna?

2. JUSTIFICACIÓN

Con este proyecto de grado, se pretende brindar una herramienta que ayude a la elaboración de esquemas de devanados trifásicos para máquinas asíncronas implantando en una plataforma didáctica, donde el estudiante pueda llevar a cabo prácticas de laboratorio en devanados, considerando esquemas de devanados imbricados. Para ello se pretende realizar la implementación con base en una máquina de inducción de 36 ranuras la cual permitirá esquemas de devanados de 2,4 y 6 polos en una o dos capas. Con esta plataforma didáctica podemos afianzar los conceptos teóricos impartidos en los cursos de conversión de energía, en una forma práctica en el laboratorio.

3. OBJETIVO GENERAL

- ✓ Desarrollar una plataforma didáctica y operativa para el aprendizaje de devanados de paso entero en máquinas eléctricas rotativas de corriente alterna.

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Diseñar e implementar un módulo didáctico para la composición de esquemas de devanados de paso entero para máquinas rotativas de corriente alterna.
- ✓ Aplicar los procesos de conversión electromagnética mediante la utilización de devanados en máquinas rotativas de corriente alterna.
- ✓ Construir una plataforma para estudiar los devanados de corriente alterna.
- ✓ Describir los procedimientos necesarios en la composición de devanados de paso entero para máquinas rotativas de corriente alterna.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. PRINCIPIOS GENERALES DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Las máquinas eléctricas son el resultado de una aplicación inteligente de los principios del electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday. Las máquinas eléctricas se caracterizan por tener circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados.

Durante todo el proceso histórico de su desarrollo desempeñaron un papel rector, que determina el movimiento de toda la ingeniería eléctrica, merced a su aplicación en los campos de la generación, transporte, distribución y utilización de la energía eléctrica. Las máquinas eléctricas realizan una conversión de energía de una forma a otra, una de las cuales, al menos, es eléctrica. Con base en este punto de vista, estrictamente energético, Es posible clasificarlas en tres tipos fundamentales: generador, motor y transformador.

4.1.1. Generador. Transforma la energía mecánica en energía eléctrica la acción se desarrolla por el movimiento de una bobina en el campo magnético, resultando una f.e.m inducida que al aplicarla a un circuito externo produce una corriente que interacciona con el campo y desarrolla una fuerza mecánica que se opone al movimiento. En consecuencia, el generador necesita una energía mecánica de entrada para producir la energía eléctrica correspondiente.

4.1.2. Motor. Que transforma la energía eléctrica en mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que interacciona con el campo produciendo un movimiento de la máquina; aparece entonces una f.e.m. inducida que se opone a la corriente y por ello se denomina fuerza contra electromotriz. En consecuencia el motor necesita una energía eléctrica de entrada para producir la energía mecánica correspondiente.

4.1.3. Transformador. Que transforma en energía eléctrica de entrada (de c.a) con determinadas magnitudes de tensión y corriente en otra energía eléctrica de salida (de c.a) con magnitudes diferentes.

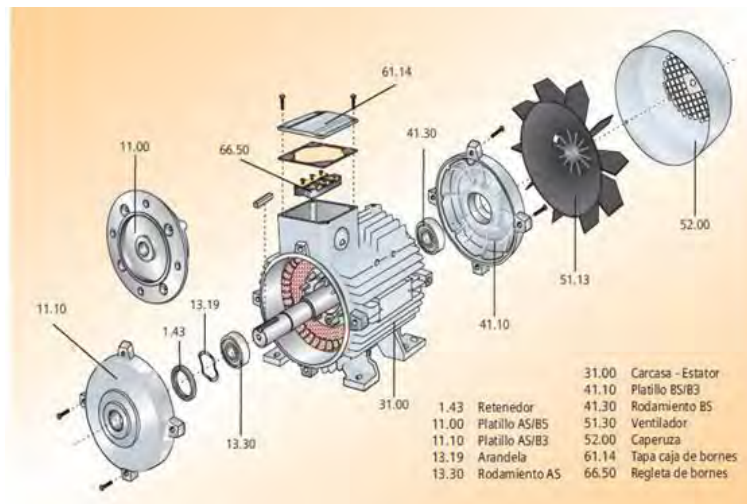
4.2. ELEMENTOS BÁSICOS DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

En términos generales, se puede decir que una máquina eléctrica rotativa se compone de dos partes. Una parte fija, que se denomina estator y que tiene forma cilíndrica; en el caso de máquinas de gran velocidad, dicho cilindro es largo en comparación con su diámetro, mientras que para las de pequeña velocidad es relativamente corto. En la cavidad del estator se coloca el rotor, que, como su nombre indica, es la parte giratoria de la máquina. El rotor se monta en un eje que descansa en dos rodamientos o cojinetes, estos pueden estar montados en sendos pedestales que se apoyan en la bancada, o formar parte de las culatas o tapas que están sujetas a la carcasa del estator. El espacio de aire que separa el estator del rotor, necesario para que pueda girar la máquina, se denomina entrehierro, siendo el campo magnético existente en el mismo el que constituye el medio de acoplamiento entre los sistemas eléctrico mecánico.

Normalmente tanto como en el estator como el rotor existen devanados hechos con conductores de cobre por los que circulan corrientes suministradas o cedidas a un circuito exterior que constituye el sistema eléctrico. Uno de los devanados tiene por misión crear un flujo en el entrehierro y por ello se denomina inductor, y también excitación o campo. El otro devanado recibe el flujo del primero y se inducen en el corrientes que se cierran por el circuito exterior y se denomina inducido. Lo mismo puede situarse el inductor en el estator y el inducido en el rotor o viceversa; lo que realmente cuenta es el movimiento relativo entre ambos devanados y teóricamente puede elegirse cualquiera de ambas soluciones, aunque en la práctica su situación la determina las condiciones tecnológicas de facilidad de construcción, aislamiento, refrigeración, etc. Desde el punto de vista de la construcción, el estator tiene su parte exterior recubierta por la carcasa o culata, estando constituida por un cilindro hueco al que se unen los pies y los dispositivos de fijación de la máquina. En las máquinas pequeñas se construyen en forma de un mono bloque de fundición de hierro colado y en las máquinas grandes se compone de dos o cuatro partes ensambladas. La forma de la carcasa varía de un constructor a otro, estando condicionada por el sistema de refrigeración y por la protección exigible en el lugar de trabajo (contra objetos sólidos, polvo, agua, etc.) en los lados de la carcasa van colocadas las tapas que cerrarán el motor y que tiene un hueco central en su interior para alojar los cojinetes del rotor.

El estator y el rotor se construyen con material ferro magnético de tal forma que para evitar pérdidas en el hierro suelen realizarse con capas magnéticas de acero al silicio, convenientemente ranuradas para alojar en su interior los devanados correspondientes.

Figura 1. Motor Trifásico de inducción



Fuente. Siemens Colombia [en línea][consultado julio de 2013]Disponible en internet: www.siemens.com.co

4.3. DEFINICIONES PARA DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

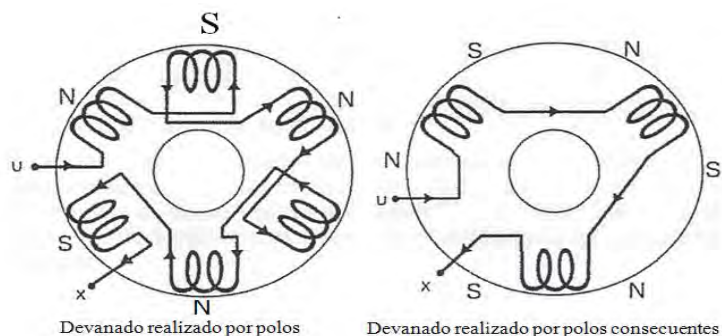
Cuando formamos un electroimán, por medio de una bobina y un núcleo de hierro, no tenemos que devanar la mitad de la bobina en un sentido y la otra mitad en otro o bien colocar dos bobinas devanadas en sentido contrario para formar sus dos polos, debido a que siempre que exista un polo norte consecuentemente ha de existir un polo sur, ya que nunca puede existir el uno sin el otro. Algo parecido sucede cuando se diseña el devanado de un motor, ya que se puede realizar con un grupo de bobinas para cada polo, tanto los norte como los sur, o bien conectar los grupos de bobinas para formar un solo tipo de polos, bien sean el norte o el sur, ya que, en este último caso, al formar una sola polaridad, consecuentemente se formará también la otra. Estos dos tipos de devanados se suelen emplear en corriente alterna, pudiéndose obtener así, para un mismo motor, los dos tipos de devanados relacionados a continuación.

- ✓ Devanados “por polos”
- ✓ Devanados “por polos consecuentes”

Como los devanados de corriente alterna pueden ser monofásicos o trifásicos y cada fase se forma generalmente por grupos de bobinas, conectadas entre sí de forma tal que el sentido de la corriente al recorrer sus lados activos vaya formando los distintos polos, podemos decir que:

- ✓ Un devanado esta realizado por polos, cuando cada una de sus fases tiene tantos grupos de bobinas (G_f) como número de polos ($2p$) tiene la máquina.
- ✓ Un devanado esta realizado por polos consecuentes, cuando cada una de sus fases está formada por tantos grupos de bobinas (G_f) como número de pares de polos (p) tiene la máquina.

Figura 2. Principio de ejecución de los devanados por polo y por polos consecuentes.



Principio de ejecución de los devanados "por polos" y "por polos consecuentes" representada una sola fase

Fuente. Reparación y bobinado de Motores Eléctricos Fernando Martínez Domínguez

En consecuencia, un motor tendrá el doble de grupos de bobinas cuando su devanado esta realizado por polos, que cuando está realizado por polos consecuentes, pero el número de bobinas por fase y, por tanto, el número de espiras de dichas bobinas ha de ser los mismos en ambos tipos de devanados.

4.4. GRUPOS DE BOBINAS POR FASE (Gf) Y NÚMERO TOTAL DE GRUPOS (G)

El número total de grupos de bobinas que ha de tener cada fase de un devanado (Gf), así como el número total de grupos de bobinas que hay que preparar para ejecutar todo el devanado (G), serán las siguientes:

- ✓ Para bobinas ejecutadas por polos

$$\text{Grupos por fase} = Gf = 2p$$

$$\text{Grupos totales} = G = 2p * q$$

- ✓ Para devanados ejecutados por polos consecuentes

$$\text{Grupos por fase} = Gf = p$$

$$\text{Grupos totales} = G = p * q$$

Siendo p = número de pares de polos; 2p = número total de polos y q = número de fases.

Se aprecia que los devanados ejecutados por polos llevan el doble de grupos de bobinas que los realizados por polos consecuentes; aunque para un mismo motor siempre ha de existir igual número de bobinas y espiras por fase.

4.5. NÚMERO DE RANURAS POR POLO Y FASE (Kpq)

Tanto para los devanados ejecutados por polos como para los ejecutados por polos consecuentes, recibe este nombre el cociente que se obtiene al dividir el número total de ranuras de la armadura, por el producto entre el número de polos (p) de la máquina y su número de fases.

$$Kpq = \frac{K}{2p * q}$$

Cuando el devanado se realiza por polos, este valor ha de ser forzosamente un numero entero y, si su valor es par, cada grupo tendrá el mismo número de bobinas, mientras que si dicho valor es impar, se debe recurrir bien sea: a realizar grupos con distintos número de bobinas, o bien bobinas con distintos número de espiras.

Cuando el devanado se ha realizado por polos consecuentes, lo ideal sería que también el número de ranuras por polo y fase fuera un número entero, para que todos los grupos tuvieran el mismo número y tipo de bobinas. No obstante, para este tipo de ejecución se puede admitir que el número de ranuras por polo y fase sea un número entero más media unidad. En este último caso deben realizarse algunas bobinas con la mitad del número de espiras.

Cuadro 1. Número de ranuras por polo y fase, para un motor trifásico

Numero de polos y ranuras de la armadura					numero de ranuras por polo y fase
2 polos	4 polos	6 polos	8 polos	10 polos	
6	12	18	24	30	1
12	24	36	48	60	2
18	36	54	72	90	3
24	48	72	96	120	4
30	60	90	120	150	5
36	72	108	144	180	6
42	84	126	168	210	7
48	96	144	192	240	8

4.5 NÚMERO TOTAL DE BOBINAS (B) Y DE BOBINAS POR GRUPO (Ug)

Los devanados de corriente alterna pueden ser ejecutados en una o dos capas por ranura, o lo que es lo mismo que cada bobina ocupe íntegramente dos ranuras completas o solamente dos mitades, superponiéndose en una misma ranura los lados activos de dos ranuras distintas por tanto, según cuál sea el tipo de ejecución, el número de bobinas que se requieren para su ejecución será distinto, a saber:

- ✓ Devanados de dos capas: $B = K$
- ✓ Devanados de una capa: $B = K/2$

Siendo K el número de ranuras de la armadura y B el número total de bobinas. Una vez determinado el número total de bobinas requeridas y el número de grupos de bobinas que ha de tener un devanado, ya que se puede determinar fácilmente el número de bobinas que ha de tener cada grupo.

$$Ug = \frac{B}{G}$$

En la práctica es más útil expresarlo según el número de ranuras de la armadura: por tanto, en función del tipo de devanado que se va a realizar tendremos:

✓ Devanados ejecutados por polos

✓ De dos capas:

$$\circ Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{2p*q}$$

✓ De una capa:

$$\circ Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{4p*q}$$

✓ Devanados ejecutados por polos consecuentes

✓ De dos capas:

$$\circ Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{p*q}$$

✓ De una capa:

$$\circ Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{2p*q}$$

4.6 DISTANCIA ENTRE PRINCIPIOS DE FASES (Yq). ANGULO ELÉCTRICO

En todo devanado de corriente alterna, es imprescindible que las distintas fases que conforman dicho devanado generen fuerzas electromotrices desfasadas entre sí el mismo ángulo, con el fin de que el campo magnético creado sea giratorio y uniforme. Para ello es necesario y suficiente que los principios de sus fases estén situados en ranuras que por su separación proporcionen el ángulo eléctrico requerido por el sistema de devanado empleado.

De acuerdo con esto, como a cada vuelta completa del rotor de una máquina le corresponden tantos ciclos eléctricos como pares de polos tiene la máquina, y como cada ciclo representa 360°, resulta que a cada vuelta del inducido le corresponden $p \cdot 360$ grados eléctricos.

Por otra parte, como en los sistemas bifásicos las corrientes están desfasadas 90° y en los trifásicos 120°, la distancia entre los principios de las fases, expresada en número de ranuras será:

✓ Devanado bifásico:

$$Yq = \frac{K}{4p} = \text{ranuras}$$

✓ Devanado trifásico

$$Yq = \frac{K}{3p} = \text{ranuras}$$

Dado que las reglas anteriores pueden cumplirse para varias ranuras por fase, a lo largo de la armadura, lo que se hace en la práctica es realizar una tabla, con tres columnas, una por cada fase, siempre que el devanado sea trifásico, donde se ponen todas las ranuras, que separadas una distancia Yq pueden ser principios de una fase. Luego se elige como principio una ranura por cada fase, que pueden ser las más próximas o no, aunque esta elección conviene hacerla según los criterios siguientes:

✚ **En estatores:** suelen elegirse los principios de fase que requieran cables más cortos; por tanto, estos serán los que estén más cerca de los orificios de salida hacia la placa de bornes.

✚ **En rotores:** es conveniente elegir los principios de fase que estén situados lo más simétricamente posible, con el objeto de mejorar el equilibrio dinámico de los rotores. Lo mejor sería poder elegir como principios de fase, ranuras separadas 120° para devanados trifásicos.

5. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LOS DEVANADOS EN MÁQUINAS ELÉCTRICAS

Los procedimientos de la representación de los devanados de máquinas eléctricas son bastante convencionales y multiformes, por lo tanto deben de explicarse con anticipación. El problema consiste en que los devanados contienen un gran número de conductores y si hubiéramos querido representar todas las conexiones entre conductores, espiras, secciones, bobinas, y grupos de bobinas en un devanado este dibujo para una máquina eléctrica resultaría ser muy complejo y su ejecución técnicamente difícil. Es prácticamente imposible en un dibujo ordinario de un proyecto de construcción de maquinaria, representar el devanado de tal modo que el dibujo diera una imagen total del mismo y que según el dibujo hubiera sido posible ejecutar los trabajos de devanado. Por esta razón se tiene que recurrir a la representación de devanados en forma de unos esquemas.

Los esquemas ofrecen una idea bastante clara acerca de la estructura y la colocación en el núcleo de todos los elementos del devanado y sus conexiones.

En los esquemas, en lo fundamental, representan solamente los conductores del devanado, tratando de omitir, en la medida de lo posible, todos los demás detalles que hacen el esquema más voluminoso y dificultan la lectura. Los datos técnicos adicionales imprescindibles se aducen en el esquema en forma de inscripciones. La bobina o sección se representa en el esquema en forma de una línea independientemente de que esta enrollada con un cable o con varios cables en paralelo. Las secciones y bobinas multiespirales se representan con una línea que forma una figura cerrada parecida a la configuración real de la sección (bobina), de la cual salen los terminales.

En los esquemas desarrollados de los devanados de dos capas, los lados de bobina o secciones que se encuentran cerca del espacio del aire, o sea, en la capa superior de la ranura, son representados con líneas llenas y los lados que yacen de la capa inferior, con líneas de trazos (punteadas).

A veces los lados activos de las bobinas en ambas capas de la ranura son representadas con líneas llenas, pero aquellos lados que están en la capa superior, se disponen a la izquierda y los de la capa inferior, a la derecha.

En los esquemas de los devanados trifásicos los conductores de diferentes fases se pueden representar con diversas líneas, por ejemplo, con líneas llenas, trazadas o de puntos y rayas, líneas de distinta coloración o de diferente grosor,

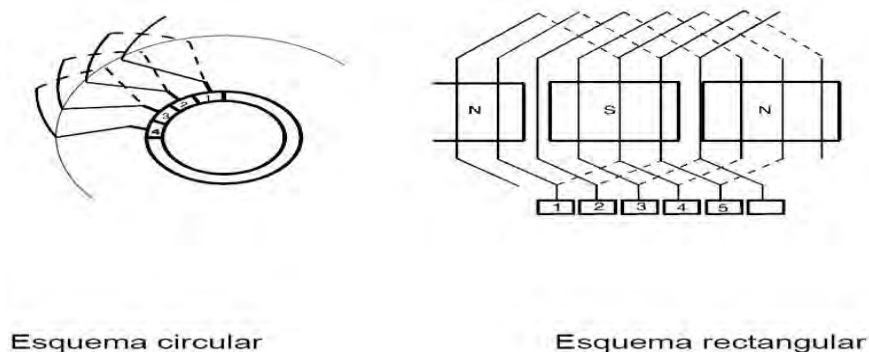
líneas dobles con diferente rayado entre ellas. Por regla, en los esquemas indican los números de ranuras, de láminas de colector, también pueden indicarse los números de bobinas y de sus lados, los números y la marcación de los terminales de los grupos de bobinas, de las fases del devanado, se indican direcciones de las corrientes, las zonas de fases, los polos de campo magnético, etc.

Los esquemas son necesarios para estudiar el principio del funcionamiento de los devanados, su estructura, propiedad y particularidades, así como para la ejecución de los trabajos de devanado. Sin verificar esquema en el proceso del trabajo, es muy difícil hacer el devanado, por lo cual antes de comenzar la reparación del devanado hace falta hacer el esquema.

Es de destacar que los esquemas completos, desarrollados y extremos, de los devanados multipolares con un gran número de ranuras, resultan ser muy voluminosos y difíciles para su lectura. En estos casos, en el proceso de ejecución de devanados, cuyos elementos se repiten, se utiliza con frecuencia los esquemas prácticos desarrollados donde se representa, por ejemplo, una fase (a veces, una parte de la misma) del devanado trifásico, o varias secciones del devanado de una máquina de colector.

También son ampliamente utilizados los esquemas extremos simplificados en los cuales los grupos de bobinas enteros son representados como un sector del arco con terminales marcados, y los elementos más pequeños del devanado no se representan o se representan en el esquema aparte. Los esquemas extremos simplificados son cómodos para ejecutar conexiones entre grupos de bobinas de los devanados complejos.

Figura 3. Representación esquemática de devanados.



Fuente: Bobina listas. Maquinas eléctrica.[en línea][consultado Julio de 2013]disponible en internet:http://agamenon.tsc.uah.es/Asignaturas/itiei/mqe/apuntes/TME1_1.pdf

5.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR ASINCRONO

El principio de funcionamiento de los motores asíncronos se fundamenta en la producción de un campo magnético giratorio. Si consideramos que el imán con sus polos N-S puede girar sobre el eje X-Y y que un disco de cobre o aluminio, que se halla sometido al campo magnético del imán, también se puede girar libremente sobre el mismo eje entonces tenemos que si giramos el imán, su campo magnético gira igualmente barriendo el disco próximo a él, con lo cual el campo, que ahora es variable, es la causa que según los principios de la inducción magnética aparezcan en el disco unas corrientes inducidas. Estas corrientes reaccionan dando lugar a una fuerza magneto motriz (F), con un par motor suficiente como para vencer el par resistente del eje y originar la rotación del disco.

Según la ley de Lenz, el sentido de rotación del disco tendrá a ponerse a la variación del campo magnético que dio origen a las f e m inducidas, o sea el campo magnético del imán. El disco, por lo tanto girará en el mismo sentido que el campo giratorio del imán, pero con una velocidad algo menor (la diferencia entre ambas velocidades se llama deslizamiento), lo que significa en realidad un sentido de giro relativo contrario al del imán.

Si el disco girase a la misma velocidad que el imán, no cortarían líneas de campo magnético y, por tanto, no se originaría en el corrientes inducidas y, como consecuencia, tampoco se originaría un par de giro.

Figura 4. Principio de funcionamiento del motor asíncrono

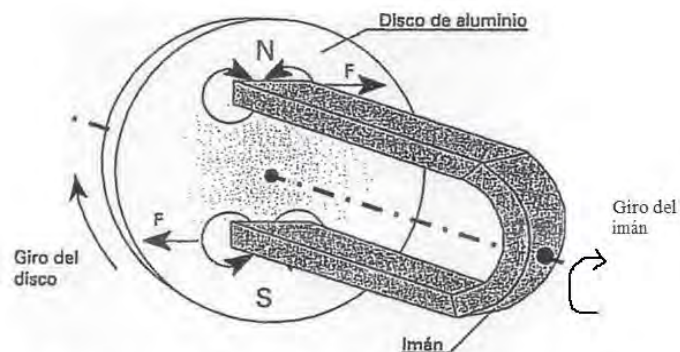


Figura 3.2. Principio de funcionamiento del motor asíncrono

Fuente. Reparación y bobinado de Motores Eléctricos Fernando Martínez Domínguez

Como la velocidad del disco es inferior a la del campo magnético, a este tipo de motor se le denomina "asíncrono", o sea que la velocidad del rotor o parte que gira no es igual a la velocidad de giro del campo magnético; en otras palabras que ambas velocidades no están en sincronismo.

5.2 CONSTITUCIÓN DEL MOTOR ASÍNCRONICO O DE INDUCCIÓN

Vemos mejor la constitución y el principio de funcionamiento de los motores de inducción asíncronos. Se trata de un motor bipolar, cuyo campo magnético es giratorio, o sea que sus polos están cambiando constantemente de norte a sur.

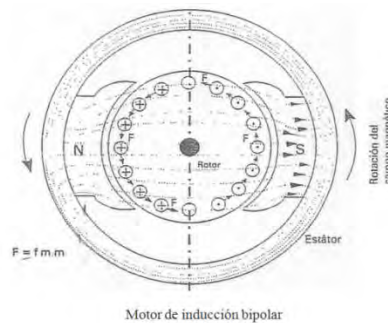
El campo magnético giratorio puede estar producido por corrientes alternas bifásicas o trifásicas, como ya veremos más adelante.

Dentro del campo magnético del estator, se halla el rotor, que es un cilindro de chapas magnéticas que puede girar libremente sobre un eje; este cilindro está atravesado por barras de cobre o aluminio unidas por sus extremos, dando así lugar a un número determinado de espiras formado entre cada dos barras consecutivas del rotor.

El campo magnético giratorio, producido por el estator o parte fija del motor, corta las barras del rotor y engendra en ellas fuerzas electromotrices inducidas que, a su vez, originan la circulación de corrientes eléctricas por las barras del rotor (su sentido instantáneo está representado por puntos, cuando salen, y cruces cuando entran). Puesto que las barras del rotor se hallan sometidas a un campo magnético y circula por ellas una corriente eléctrica.

Estas están sometidas a una fuerza magneto motriz (F) que tiende a moverlas en dirección perpendicular al campo magnético, arrastrando en su movimiento al rotor del motor.

Figura 5. Motor de inducción bipolar



Fuente. Reparación y bobinado de Motores Eléctricos Fernando Martínez Domínguez

Como el campo magnético está cambiando constantemente de sentido, también cambiará el sentido de las corrientes de las barras del rotor, permaneciendo invariable el sentido del movimiento.

5.3 MOTOR ASINCRONO TRIFÁSICO

El motor asíncrono trifásico, que como ya hemos dicho es el más empleado industrialmente, es aquel que está alimentado por un sistema trifásico de corrientes alternas. Las características de éste tipo de motores quedan definidas por el fabricante en su placa de características, que es solidaria a la carcasa del motor, Como mínimo la placa de características ha de contener la siguiente información:

- Identificación del fabricante.
- Tipo de motor, con tamaño y forma
- Número de fabricación.
- Clase de protección contra entrada de polvo y agua (IP).
- Potencia del motor, expresada en KW o C.V.
- Tensión de alimentación, expresada en V o KV.
- Frecuencia, expresada en Hz.
- Intensidad de corriente absorbida a plena carga, en A.
- Velocidad del motor, expresada en revoluciones por minuto.
- Factor de potencia del motor (Coseno de ϕ).
- Otras que el fabricante o la legislación estimen oportunas.

En cuanto a la tensión de alimentación, los motores trifásicos casi siempre indican dos tensiones en su placa de características (por ejemplo 125/220 V o 220/380V). Esto es debido a que un bobinado trifásico puede estar interconectado entre sí y con la red de alimentación en estrella o en triángulo, de tal forma que aunque las fases reciban la misma tensión, la de la red de alimentación puede ser distinta.

5.4. CAMPO MAGNETICO GIRATORIO

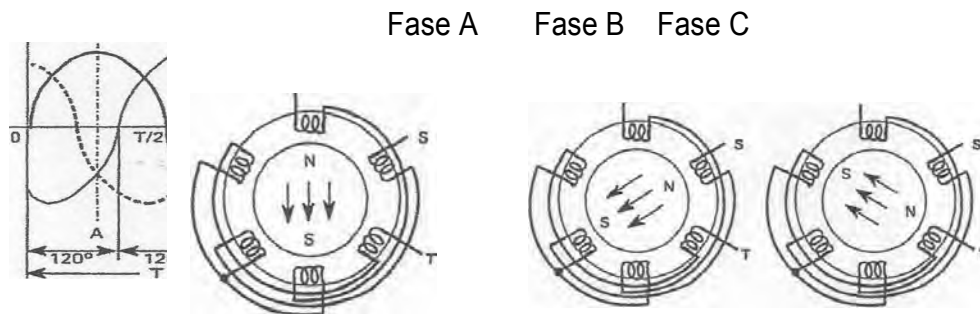
Cuando un bobinado triásico, con bobinas desplazadas 120° es conectado a una corriente alterna trifásica, automáticamente se va generando en el mismo un campo magnético giratorio y constante. Es decir, la orientación Norte- Sur de los polos va girando constantemente alrededor de su eje para invertir el sentido de giro del campo hay que cambiar el orden de alimentación de sus fases.

Este campo magnético se forma por la combinación de cada uno de los campos magnéticos de los tres devanados monofásicos que forman el devanado trifásico del motor, este campo giratorio. Tal como ya hemos visto, induce en el devanado o barras del rotor una corriente, que es la encargada de que se produzca la fuerza magneto motriz que da origen al movimiento.

Campo magnético pasa a ser la del "*Instante B*". Después decrece la corriente en el *devanado S* y aumenta en el *devanado T*, de tal modo que el campo magnético que prevalece es el del "*Instante C*", A continuación decrece la corriente de la *fase T* y empieza a crecer de nuevo la de la *fase R*. con lo cual volvemos de nuevo al campo magnético del "*Instante A*" y así sucesivamente.

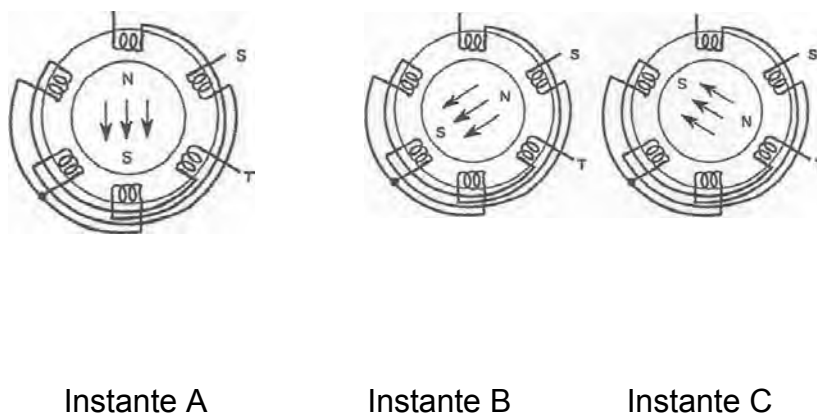
El resultado es que la orientación Norte-Sur del campo magnético gira constantemente, debido simplemente a la posición física de los tres devanados monofásicos en el motor y al desfase de 120° existente entre las tres fases de la red alterna trifásica. Luego el resto ya lo sabemos, este campo magnético giratorio induce en el devanado del rotor unas corrientes, que a su vez originan una fuerza magneto motriz causante del giro del rotor.

Figura 6. Esquema sinusoidal a 120° eléctricos.



Fuente. Reparación y bobinado de Motores Eléctricos Fernando Martínez Domínguez

Figura 7. Campo Giratorio de un motor asíncrono trifásico de corriente alterna



Fuente. Reparación y bobinado de Motores Eléctricos Fernando Martínez Domínguez

La velocidad del rotor siempre ha de ser menor que la del campo magnético giratorio ya que, en caso contrario, si el rotor girase a la misma velocidad que el flujo magnético, sus barras no lo cortarían y no se engendrarían en ellas f.e.m. inducidas, con lo cual la corriente en el rotor sería cero. En consecuencia las fuerzas electromotrices y el par también serán nulos por lo tanto, el rotor nunca deberá girar tan deprisa como el campo magnético del estator.

5.5 VELOCIDAD DE LOS MOTORES ASINCRONOS

Al contrario que en los alternadores, al no ser estos motores maquinas síncronas, su velocidad no guarda exactamente la relación:

$$Velocidad = n = \frac{Frecuencia \times 60}{N^{\circ} \text{ pares de polos}} = \frac{f \times 60}{p} = r.p.m$$

Aunque el valor de la frecuencia (f) se mantenga constante, el número de revoluciones (n), de un motor asíncrono trifásico no es constante, ya que varía algo con la carga del motor. Asimismo se sabe que siempre será algo menor la velocidad del rotor que la del campo magnético giratorio. (Entre un 2 para los motores grandes y un 6 para los motores pequeños). La diferencia entre la velocidad del campo magnético giratorio y la del rotor se denomina deslizamiento y suele representarse con la letra (s).

El deslizamiento suele expresarse en tanto por ciento, entre la velocidad del campo magnético (n) o velocidad de sincronismo. Y la velocidad real de giro del rotor (n') o velocidad asíncrona y su valor es:

$$Deslizamiento = s = \frac{n - n''}{n} \cdot \% = \frac{n - n''}{n} 100 = \%$$

Por tanto, la velocidad real de un motor asíncrono será igual a la velocidad del campo magnético menos el deslizamiento del motor,

$$Velocidad \text{ de deslizamiento} = n_s = n - n'', n'' = n - n_s$$

Dado que en algunos países del mundo la frecuencia es de 60 Hz, en Europa es a 50 Hz la velocidad de sincronismo de un motor (n) dependerá solamente del número de pares de polos del mismo (p), siendo las más comunes 1 de 3.600 y 1800 r.p.m. A más de 3 600 r.p.m. no puede girar el campo magnético del estator, dado que menos de dos polos no puede tener; por tanto, la máxima velocidad real de un motor asíncrono suele ser de unas 3.620 r.p.m.

5.6 PAR DE ARRANQUE

Las fuerzas magneto motrices que aparecen en los devanados o barras del rotor dan lugar a un par de fuerzas, denominado par motor (C), que son las causantes del giro del rotor su valor es:

$$P_{\text{motor}} = C = K\Phi I_2$$

Siendo:

K= constante, dependiente de las características constructivas de la máquina.

ϕ = flujo giratorio del estator, por polo.

I_2 = Corriente rotórica.

Es muy interesante observar que el par motor depende de las corrientes de rotor y que éstas, como veremos a continuación, son muy grandes en el momento del arranque y disminuyen al aumentar la velocidad, con lo cual en un motor podemos considerar siempre dos pares distintos:

- Par de arranque.
- Par normal o de régimen.

Al meter corriente para arrancar, cuando el rotor esta aun parado, la frecuencia de las f.e.m. engendradas en el rotor, es la misma que la frecuencia de la tensión aplicada al estator (estator y rotor se comportan como un transformador) y, por tanto, las corrientes del estator y del rotor tienen la misma frecuencia.

$$\text{Frecuencia en el rotor} = f_2 = f - s$$

Ahora bien, la resistencia de las barras o el devanado del rotor es muy pequeña (R_2); pero por estar rodeadas de hierro tienen mucha autoinducción y su reactancia (X_2) es grande, comparada con su resistencia. El valor eficaz de las corrientes del rotor en el momento del arranque es muy grande.

Al ir aumentando la velocidad del rotor, cada vez corta menos líneas de fuerza

del estator y, por tanto, las f.e.m. Inducidas en el rotor también van decreciendo, de tal forma que el valor y la frecuencia de las f.e.m. Rotóricas también disminuyen al aumentar la velocidad del rotor en consecuencia cuando el rotor acelera y las f.e.m. y sus frecuencias decrecen, también decrecen las corrientes rotoricas I_2 , debido a que la reactancia inductiva del devanado del rotor también disminuye, por ser proporcional a la frecuencia y, por tanto, el par motor, que depende principalmente de las corrientes del rotor, también disminuye.

En un motor asíncrono el par de arranque puede llegar a ser tres veces mayor que el par normal a plena carga. Esto es muy interesante ya que facilita grandemente el arranque de los motores asíncronos, conectados a cargas difíciles.

5.7 TIPOS DE ROTOR EN MOTORES ASINCRONOS DE CORRIENTE ALTERNA

A continuación veremos que la construcción del rotor, ya sea de jaula de ardilla o bobinado, puede influir mucho en el par de arranque de los motores, ya que cuanto menor sea la impedancia del devanado rotórico. Tanto mayor serán las corrientes en él inducidas y por tanto, mayor será el par de arranque de dicho motor.

Aunque los tipos de rotor pueden ser muy diversos. Los más empleados en motores asíncronos de corriente alterna son los relacionados a continuación:

- ✓ Rotor de jaula de ardilla. De estos hay varios tipos, siendo los más utilizados los de:
- ✓ Jaula simple.
- ✓ Jaula doble.
- ✓ De ranura profunda.
- ✓ Rotor Bobinado.

5.8 ROTOR DE JAULA DE ARDILLA (resistencia elevada)

Este tipo de rotor, de jaula de ardilla, está formado por una serie de barras de

cobre o aluminio, situadas en la periferia de las chapas magnéticas, las barras pueden ser de forma cilíndrica o rectangular y en algunos casos incluso se colocan en ranuras abiertas o semi abiertas, para que queden más cerca aun de la periferia del rotor.

Este tipo de rotor se emplea para motores pequeños cuyo arranque no sea muy exigente en cuanto a potencia requerida, en el momento del arranque suelen absorber de la red una gran intensidad, de 6 a 7 veces nominal del motor, por lo que no es muy aconsejable en motores de gran potencia su par de arranque suele ser como máximo el 140 del par nominal.

Tiene un elevado deslizamiento y soporta muy mal las puntas de carga y su rendimiento a plena carga suele ser un 5 o un 6 inferior al de doble jaula de ardilla, que prácticamente lo está sustituyendo, sobre todo en potencias medias o grandes, donde se requeriría un arranque con tensión reducida, para disminuir la punta de corriente en el arranque, lo que a su vez acarrearía también una disminución del par de arranque.

5.9 FACTOR DEL DEVANADO

Partiendo que tenemos una máquina de c.a. en la que existe un campo magnético giratorio con una distribución senoidal a lo largo del entrehierro (en general no va a ser perfectamente senoidal pero se puede descomponer en serie de Fourier correspondiendo a cada armónico un armónico de la fuerza electromotriz). Si en esta máquina las ranuras están distribuidas en sentido axial, las bobinas tienen un ancho diametral y para cada par de polos adyacentes las bobinas de una fase se hallan agrupadas en dos únicas ranuras y todas las bobinas de una misma fase conectadas en serie, la f.e.m. inducida en una fase vendrá dada por la expresión:

$$E = \sqrt{2\pi.N_c.\phi.f}$$

Siendo:

Nc= Número de espiras total de una fase
 ϕ = Flujo de cada polo
F = Frecuencia eléctrica.

Ahora bien, si como es normal las bobinas correspondientes a cada par de polos no van alojadas en dos únicas ranuras sino que van distribuidas en más pares, dado que las tensiones inducidas en dos ranuras adyacentes no van a estar en fase, la tensión resultante de su conexión en serie no va a ser el doble sino algo menor, el llamado factor de distribución, K_d que recoge el efecto de ese desfase. Por otra parte si la bobina no tienen un ancho diametral, esto es, si cuando un lado está frente a un polo N, por ejemplo, el otro lado no está justo frente al polo S, no coincidirá en el tiempo el máximo de f.e.m. en un lado con el máximo en el otro lado activo, por tanto la tensión máxima inducida en la espira será menor del doble de la tensión máxima inducida en un lado de la bobina. Quiere ello decir que el resultado anterior habría que multiplicado por un nuevo coeficiente que llamamos factor de paso, K_p . Ya por último si las ranuras no están colocadas paralelamente al eje sino ligeramente inclinadas a lo largo de la periferia, (o bien son los polos los que están inclinados) cada sección del haz activo no va a alcanzar simultáneamente el máximo de f.e.m. inducido; por tanto de nuevo habría que multiplicar el resultado anterior obtenido por un nuevo coeficiente, K_p que llamamos factor de inclinación.

Factor de acortamiento de paso K_p :

$$K_p = \sin \frac{\rho}{2} = \cos \frac{\beta}{2} = \cos \frac{1}{2} \left\{ 180 \cdot \left\{ 1 - \frac{y_k}{y_p} \right\} \right\}$$

Siendo:

K_p = Ancho de bobina en grados eléctricos.

Y_p = Paso polar en número de ranuras.

Y_k = Ancho de bobina en número de ranuras, y como expresión general referido al armónico de orden v .

$$k_{pv} = \sin \frac{vp}{2}$$

Factor de distribución K_d .

$$k_{dv} = \frac{\sin \frac{vn\gamma}{2}}{n \cdot \sin \frac{v\gamma}{2}}$$

Siendo:

γ : separación de los lados activos de bobinas contiguas del mismo grupo de medida en grados eléctricos.

n : número de bobinas por grupo.

Y en general el factor de distribución para el armónico de orden v es:

$$k_{dv} = \frac{\text{sen} \frac{vn\gamma}{2}}{n.\text{sen} \frac{v\gamma}{2}} \quad \text{Factor de inclinación, } K_i$$

$$k_i = \frac{\text{sen} \frac{v\alpha_i}{2}}{n.\text{sen} \frac{\alpha_i}{2}} \cong 1 - \frac{\alpha_i^2}{24}$$

Siendo

α_i : Arco correspondiente a la inclinación de ranura (arco proyectado por la ranura sobre un plano perpendicular al eje), y para el armónico de orden v .

$$k_i = \frac{\text{sen} \frac{v\alpha_i}{2}}{n.\text{sen} \frac{\alpha_i}{2}}$$

5.10 INTERVALOS DE VARIACION

Se dispone de un bobinado diseñado "racionalmente", así por ejemplo si tenemos un grupo formado por varias bobinas para ser conectadas en serie, las conexiones se supone que están hechas de forma que la f.e.m. resultante sea la máxima posible. Veamos ahora entre que valores pueden oscilar cada uno los factores vistos en el apartado anterior.

5.10.1. Factor de distribución. Partimos del caso de que disponemos de un conjunto de varias bobinas cada una de ellas de paso diametral y tratamos de ver cuál sería el factor de distribución para los dos casos límite siguientes:

- ✓ El menor número posible de bobinas correspondiente a cada par de polos que, independientemente del número de polos de la máquina, será de uno.

El mayor número posible que, consideraciones de índole constructiva aparte, puede ser cualquiera, por tanto como límite infinito. Conviene hacer el análisis para tres sus apartados.

- ✓ Para devanados en los que, en general el ranurado de una fase ocupa 120° eléctricos de cada 360° . Es el caso de los devanados trifásicos.
- ✓ Para devanados en los que el devanado puede ocupar hasta los 180° eléctricos de cada 360° . Es el caso de los devanados bifásicos.
- ✓ Devanados en los que todas las ranuras pueden estar ocupadas por la misma única fase. Caso de los devanados monofásicos.

Para el primer su apartado calculemos el valor límite para un número de ramas infinito, $K \rightarrow \infty$ y por tanto ángulo eléctrico entre ranuras, γ , $\gamma \rightarrow 0$, expresando todos los ángulos en grados eléctricos:

Para este caso $n\gamma = 60^\circ$, $\sin n\gamma/2 = \frac{1}{2}$

Por otra parte podemos expresar $n \cdot \sin \gamma/2$ en función del número de polos y de ranuras que para el caso de devanados trifásicos es:

$$k_d = \frac{\sin \frac{v n \gamma}{2}}{n \cdot \sin \frac{v \gamma}{2}} ; \quad n \cdot \sin \frac{\gamma}{2} = \frac{k}{2 \cdot 3 \cdot p} \sin \frac{\frac{2\pi \cdot p}{k}}{2} = \frac{k}{6 \cdot p} \sin \frac{\pi \cdot p}{k} ; \sin \frac{\pi \cdot p}{k} = \frac{\pi \cdot p}{k}$$

En el límite, por lo tanto:

$$n \cdot \sin \frac{\gamma}{2} = \frac{k}{6 \cdot p} \cdot \frac{\pi \cdot p}{k} = \frac{\pi}{6}$$

Con lo que el límite inferior será:

$$K_d = \frac{\frac{1}{2}}{\frac{\pi}{6}} = \frac{3}{\pi} \cong 0.9549$$

El límite superior corresponde al caso de devanado de una fase en dos únicas ranuras por cada par de polos, $K_s = 1$.

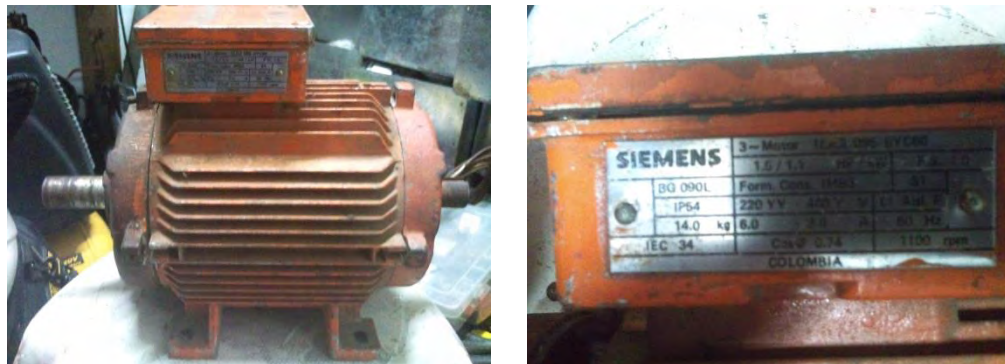
6. METODOLOGÍA

Presentamos una herramienta para la elaboración de esquemas de devanado (imbricados) de paso entero en máquinas rotativas trifásicas de corriente alterna, entregando un módulo didáctico, en el cual los estudiantes de la Universidad Autónoma de Occidente pertenecientes al programa de Ingeniería Eléctrica puedan fortalecer el contenido temático de los cursos de Conversión de la Energía.

El proyecto tiene como objetivo analizar y evaluar el comportamiento de una máquina eléctrica rotativa de corriente alterna mediante la utilización de devanados. Para ello se realizó la implementación sobre una máquina trifásica de inducción de 36 ranuras la cual permite esquemas de devanados de 2, 4 y 6 polos, en una o dos capas, que se conectarán a un bornero de conexión donde el alumno puede hacer sus diferentes tipos de ejercicios y aplicar los tipos de devanados según la configuración y paso. Para tal efecto se dispondrá del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Eléctrica para realizar pruebas y ensayos en la plataforma didáctica de devanados en motores asincrónicos trifásicos de corriente alterna, y se contará con la dirección del Ingeniero Electricista Paul Andrés Manrique, con el fin de verificar si lo realizado en la plataforma didáctica está bien elaborado y coincide con el cálculo y la teoría de devanados.

Consecución de un motor trifásico SIEMENS de 36 ranuras, que originalmente tiene las siguientes características técnicas 1.5HP / 1.1Kw, 60 Hz, 1100 RPM, clase de aislamiento F, tensión de conexión 220YY/ 440Y, corriente para 220V-6A y 440-3 Amperios, 1100 RPM (6 Polos).

Figura 8. Motor SIEMENS de 36 ranuras



7. METODOS DE CÁLCULO PARA MOTORES TRIFASICOS

7.1. INTRODUCCIÓN

El método de cálculo se llevará a cabo a partir de las dimensiones de la estructura ferromagnética, de modo que conociendo las áreas correspondientes a los dientes y la culata y empleando las densidades de flujo recomendadas, se puede determinar el flujo por pelo de la máquina y con ello, el número de vueltas por fase.

Conociendo el número de vueltas a colocar en cada ranura, su sección transversal y el factor de espaciamento, es posible calcular el área del conductor. Una vez calculado lo anterior, a partir de recomendaciones estándar de carga lineal y densidad de corriente, se puede determinar la corriente nominal de la máquina y, finalmente, hallar la potencia aproximada de salida.

A continuación se describirá el método de cálculo, analizando cada paso necesario. Se presentan ejemplos con el propósito de sistematizar la metodología.

7.2. CÁLCULO DEL ÁREA DE LOS DIENTES Y DE LA CULATA

Para determinar las áreas de la culata, es necesario tomar las medidas que a continuación se indican, (Figura 4.1). Así, se determina el ancho tras la ranura o culata DDR longitud axial del núcleo DAX, si existen, el ancho y número de los conductos de ventilación WV y VN, respectivamente. La longitud neta del núcleo viene dada por:

$$DN = (DAX - VN.WV).KC \quad (4.1)$$

Donde KC es el factor de apilamiento, que puede ser tomado igual a 0.97.

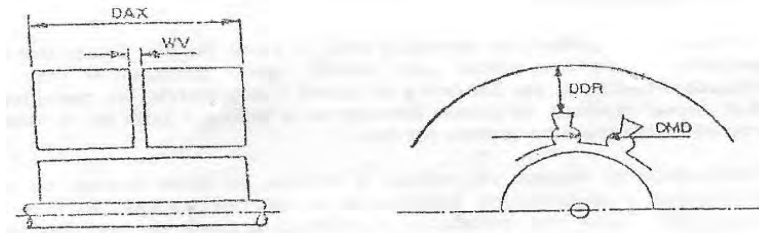
El área tras la ranura o culata está dada por:

$$ATR = DDR.DN \quad (4.2)$$

Para calcular el área de los dientes, es necesario determinar el ancho mínimo del diente, puesto que el área correspondiente en esta zona será menor y por tanto, la que determina la inducción crítica. Ahora bien, como veremos a continuación, se desea calcular el flujo por polo, por lo que determinaremos el área total de los dientes bajo cada polo, que queda expresada como:

$$ATD = DN \times DMD \times (S/P) \quad (4.3)$$

Figura 9. Dimensiones de la estructura ferromagnética.



Fuente. Cálculo de devanados de motores asincrónicos Dr. Percy viego Felipe.

7.3 DENSIDADES DE FLUJO

Culatas de áreas anteriores. Hay que seleccionar las densidades de flujo para determinar el flujo por polo que permite el material ferromagnético.

Los valores de inducción tienen un límite superior que está determinado por la aparición de una fuerte saturación del circuito magnético, que conduce a un considerable crecimiento de la corriente en vacío y, en consecuencia, de la corriente del estator. Esto conduce a la reducción del factor de potencia, al aumento de las pérdidas y a la disminución de la eficiencia, así como al mayor calentamiento de la máquina.

Por el contrario, una baja densidad de flujo, aunque hace que los anteriores valores sean favorables, lleva a una reducción de la potencia nominal por unidad de volumen de material activo.

La selección de la inducción está determinada por factores tales como el tipo de ranura, el número de polos, el tipo de protección contra el medio ambiente, así como el régimen de trabajo de la máquina. Otro factor que influye en el valor de la inducción a utilizar, es el tipo de material ferromagnético, pero en este caso de un trabajo de rebobinado, no se considera, puesto que usualmente se desconoce. Entonces, se seleccionan valores promedio. Los cuales dan buenos resultados prácticos.

Valores superiores dados en las tablas, para mantener un margen de seguridad contra posibles errores en las mediciones de las dimensiones y en la consideración de diferentes parámetros. Además, si el voltaje en el circuito que alimentará al motor está por encima del 5% de nominal, deberá reducirse la inducción proporcionalmente.

Cuadro 2. Valores recomendados de inducción (T) en los dientes

H(mm)	p	Cerrado con ventilación forzada (TEFC)	Abierto a prueba de goteo (ODP)
50-132	2,4,6	1.65-1.85	1.65-1.85
50-132	8	1.60-1.80	1.60-1.80
160-250	2	1.65- 1.85	1.80-2.00
160-250	4,6,8,	1.60-1.75	1.70-1.90
≥280 o de ranuras abiertas	2,4,6,8,10,12	1.50-1.70	1.60-1.80

Fuente. Dr. PERCY VIEGO Felipe. Cálculo de devanados de motores asincrónicos

Cuadro 3. Valores recomendados de inducción (T) en la culata

H(mm)	p	Cerrado con ventilación forzada (TEFC)	Abierto a prueba de goteo (ODP)
50-132	2,4	1.40-1.55	1.40-1.55
50-132	6	1.40-1.55	1.40-1.50
50-132	8	1.10-1.30	1.10-1.30
160-250	2,4	1.40-1.50	1.45-1.60
160-250	6	1.30-1.40	1.40-1.50
160-250	8	1.00-1.10	1.10-1.25
≥280 o de ranuras abiertas	2,4,6,	1.30-1.40	1.40-1.50
≥280 o de ranuras abiertas	8	1.25-1.40	1.35-1.45

Fuente. Dr. PERCY VIEGO Felipe. Cálculo de devanados de motores asíncronos

En los casos de motores de régimen intermitente o de corto tiempo, esas densidades pueden aumentarse; pero el estudio de estos tipos de máquina se sale de los propósitos de este trabajo.

7.4 FLUJO POR POLO

Para calcular el flujo por polo, se supone que la inducción en el entrehierro se distribuye senoidalmente, por lo que el valor promedio estará dado por $2/\pi$ veces el valor máximo. Así, el flujo por polo permisible se expresa por:

$$FPP = (2.BTH.ATD)/\pi = (BTH.ATD)/1.57 \quad (4.4)$$

El valor del flujo calculado mediante la expresión (4.4) está determinado por la inducción permisible en el diente, puesto que se tomó este valor como

punto de partida. Sin embargo, es necesario comprobar si este flujo provoca un valor de inducción en la culata que se encuentre dentro de los límites dados en la Tabla 3. Para ello es necesario tener presente que el flujo por polo, al pasar a través de la culata, se divide en dos partes iguales, produciendo una inducción que está dada por:

$$BCC = (0.5.FPP) / ATR \quad (4.5)$$

Si el valor de la inducción obtenida mediante la expresión (4.5) es superior al dado en la mencionada tabla, es necesario entonces partir del valor de inducción permisible en la culata y volver a calcular el flujo por polo. Lo expresado anteriormente es importante, puesto que un motor fabricado para un determinado número de polos, presenta una relación de áreas de dientes y de culata, que determinan una relación de densidades de flujo dentro de los límites permisibles. Sin embargo, si se quiere hacer el cálculo del devanado con un número de polos diferentes al original, se produce una relación de densidades de flujo no acorde con la indicada entre los límites permisibles, por lo que en una de esas secciones la inducción es superior a la recomendada. Así, si el número de polos será superior al original la zona del diente es la limitante y si es inferior la limitante es la zona de la culata.

7.5 TIPO DE DEVANADO

Se utilizan generalmente los devanados distribuidos de simple capa o de doble capa. El devanado de doble capa es aquel donde en cada ranura existen dos lados de bobina y el de simple capa donde solamente hay un lado de bobina por ranura. En la mayoría de los casos, se selecciona el devanado de doble capa para facilitar el proceso de confección de las bobinas.

Los devanados de las máquinas de propósitos generales de bajo voltaje, hasta potencias de alrededor de 100 kW (dependiendo del número de polos, entre otros factores) suelen construirse con conductores redondos. Con potencias superiores (o en los casos en que existen exigencias especiales en cuanto a aislamiento) se emplean conductores rectangulares.

El devanado puede ser entero o simétrico y fraccionario o asimétrico, dependiendo ello del número de polos y ranuras de la máquina. El devanado se denomina fraccionario cuando el número de bobinas por grupo de polos, o

sea, las bobinas por polo y por fase, son diferentes en número; y entero cuando son iguales.

7.6 CÁLCULO DEL NÚMERO DE BOBINAS POR GRUPO DE POLO

El número de bobinas correspondientes a los grupos de polos de cada fase, es decir, las bobinas por polo y por fase, se determina de diferente forma, dependiendo de si el devanado es de doble o de simple capa. Cuando es de doble capa, se aplica la expresión (4.6) Y cuando es de simple capa, la (4.7).

$$Z = S / 3P \text{ DOBLE CAPA (4.6)}$$

$$Z = S / 6P \text{ SIMPLE CAPA (4.7)}$$

Si el devanado es fraccionario (se conoce cuando las expresiones anteriores no dan un valor entero), es necesario hacer una distribución de bobinas diferentes en cada polo, pero siempre manteniendo igual número de bobinas por fase, de modo que la máquina siempre resulte balanceada.

Para ilustrar todo lo expuesto anteriormente, se expondrán a continuación dos ejemplos. Supongamos que se tiene un motor trifásico de 36 ranuras que se quiere devanar para 6 polos con un devanado de doble capa. Bajo estas condiciones, según (4.6) se tiene:

$$Z = 36 / (6 \cdot 3) = 2$$

Así, cada polo tendrá dos bobinas y en cada fase existirán doce bobinas en total.

Sin embargo, si el motor anterior quiere ser devanado para 8 polos, queda el siguiente valor fraccionario:

Puesto Que es imposible colocar 1.5 bobinas por grupo de polo, se deben confeccionar 4 grupos de polo con dos bobinas y 4 con una, en cada fase.

Así Se obtiene un devanado balanceado ya que en cada fase existe un total de 12 bobinas.

7.7 FACTORES DE DEVANADO

7.7.1. Devanados de doble capa.

Factor de paso:

El factor de paso de una bobina viene dado por:

$$FP = \text{sen} \frac{\alpha}{2} \quad (4.8)$$

Cuando el valor del paso de bobina es menor de 180° , el devanado se denomina de paso fraccionario o reducido. Un devanado con bobinas de paso fraccionario, presenta las siguientes ventajas:

- ✓ Reduce el contenido de armónicos.
- ✓ Reduce la reactancia de dispersión.
- ✓ Las bobinas requieren menor cantidad de cobre.
- ✓ Reduce la longitud de las conexiones terminales.

Sin embargo, reduce la utilización del volumen total de cobre del devanado.

De acuerdo con lo anterior, vemos que el factor de paso está relacionado con elementos contradictorios, por lo cual no resulta fácil una selección del mismo. Sin embargo, puesto que uno de los elementos más perjudiciales en el comportamiento del motor son los armónicos, la selección del factor de paso por lo general debe nacerse en función de la eliminación de dichos armónicos.

A partir de lo expuesto anteriormente, se recomienda seleccionar un paso de bobina expresando en ranuras de:

$$Y1 = (0.58 \text{ a } 0.63) \text{ e } (S/P) \text{ con máquinas de dos polos}$$

Y1 deberá redondearse a un número entero de ranuras.

Transformando la Ecuación 4.8, el factor de paso de una bobina vendrá entonces dado por:

$$FP = \text{sen}\left(Y1(p/s)\frac{180^\circ}{2}\right) \quad (4.9)$$

7.8 FACTOR DE DISTRIBUCIÓN

7.8.1. Devanados enteros de doble capa

Factor de distribución está dado por:

$$FD = \frac{\text{sen}(Z.\beta/2)}{Z.\text{sen}(\beta/2)}$$

(4.10) El factor de distribución estará dado por la misma expresión (4.10).

Donde $\beta = 360^\circ \cdot (p/2)/Z$ (4.11)

Este factor puede calcularse conociendo sólo el número de ranuras y polos de la máquina a bobinar.

7.8.2. Devanados de simple capa. Hay distintos tipos de devanados de simple capa pero sería muy extenso analizar el factor de devanado de cada uno. Por esta razón, se hará mención al caso más común, que es el tipo concéntrico de una capa. Aunque las bobinas de estos devanados concéntricos tienen diferentes pasos, se consideran siempre, en esencia, como de paso entero.

7.9 TIPO DE CONEXIÓN

Para calcular el número de vueltas por fase es necesario conocer el voltaje nominal, así como seleccionar el tipo de conexión que se requiera para el devanado si la máquina se va a trabajar a dos voltajes diferentes, uno el doble del otro, es preferible utilizar la conexión estrella-serie/estrella-paralelo, en vez de la delta-serie/delta-paralelo, puesto que el número de terminales necesarios en el primer caso es menor. Además, la conexión estrella está libre de circulación de las corrientes armónicas presentes en el caso del circuito cerrado de la delta, eliminando así el calentamiento debido a ello. Sin embargo, si el motor calculado va a utilizarse con un arrancador estrella - delta, resulta necesario hacer el cálculo para la conexión delta que es con la que opera la máquina. También es necesario conocer la frecuencia de voltaje aplicado, el flujo por polo, así como los factores de devanado.

7.10 CÁLCULO DE NÚMERO DE VUELTAS POR FASE

La expresión fundamental de voltaje está dada por la ecuación:

$$VF = KE.4.44.F.NF.FPP.FP.FD \quad (4.12)$$

Donde KE considera la caída por impedancia en el devanado del estator, expresada como la relación entre la fem de fase del devanado del estator con respecto al voltaje de fase.

$$Y1 = S/P$$

$$NF = VF / (KE.4.44.F.FPP.FD.FP) \quad (4.13)$$

El número de vueltas así obtenido no debe redondearse ahora, sino en el próximo paso, cuando se calcula el número de vueltas por bobina.

7.11 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE VUELTAS POR BOBINA

El número de vueltas por bobina está dado por la relación del número de vueltas totales si número de bobinas. Para un devanado de doble capa, como el número de bobinas coincide con el número de ranuras, se tiene:

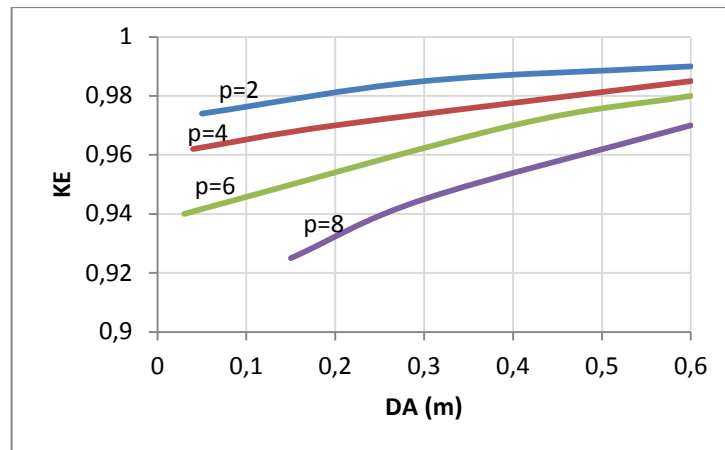
$$NC=NT/S=3NF/S \quad (4.14)$$

Si se escoge un devanado de simple capa, puesto que el número de bobinas es la mitad del número de ranuras, las vueltas por bobina esta dadas por:

$$NC= (3NF)/(S/2)=6NF/S \quad (4.15)$$

Es aquí donde se redondean los valores de NC con NC se pueden entonces regresar a la ecuación (1.14) o a la (1.15) para recalcular NF y reajustar el cálculo de valores anteriores, si es necesario.

Figura 10. Gráfico Coeficiente de caída de impedancia en el devanado del estator.



Fuente. Dr. PERCY VIEGO Felipe. Cálculo de devanados de motores asincrónicos

7.12 CÁLCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR

7.12.1. Devanados con conductores redondos. Para determinar el calibre cuando se emplean conductores redondos es necesario conocer el número de conductores por ranura, el área de la ranura disponible, así como el factor de espaciado correspondiente, que expresa la cantidad de área de cobre a colocar en la ranura.

7.13 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CONDUCTORES POR RANURAS

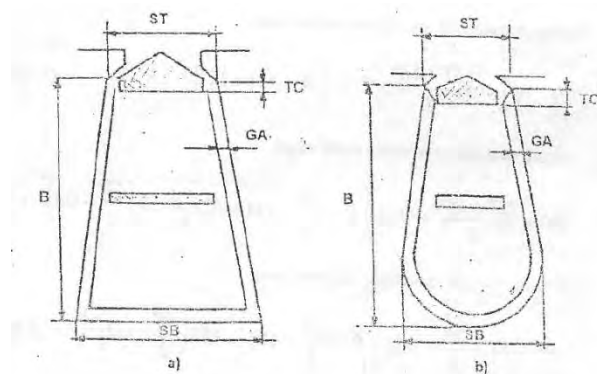
El número de conductores por ranura es igual al número de vueltas por bobina para el devanado de simple capa y el doble para devanados de doble capa. Este factor es calculado aplicando la Ecuación (4.16), tanto para devanados de simple como de doble capa.

$$NR=6 NF/S \quad (4.16)$$

Determinación del área de ranura disponible:

Para determinar el área de ranura disponible para alojar los conductores con su aislamiento, es necesario restar del área total de la ranura las áreas.

Figura 11. Dimensiones de las ranuras.



Fuente. Cálculo de devanados de motores asíncronos Dr. Percy Viego Felipe.

Dimensiones de las ranuras:

- ✓ Ranura trapezoidal.
- ✓ Ranura Ovalada.

Correspondientes a los aislamientos de ranura, entre bobinas (en el caso de los devanados de doble capa) y de la cuña. Se debe determinar el espesor de dichos aislamientos, de acuerdo con la Figura anterior.

A continuación se dan las expresiones para calcular el área neta de la ranura, considerando algunas de las variantes fundamentales.

Ranura trapezoidal, devanados de doble capa:

$$AN = \left[\frac{ST+SB}{2} - 2 \cdot GA \right] [B - (2GA + TC)] \quad (4.17)$$

Ranura trapezoidal devanado de simple capa:

$$AN = \left[\frac{ST+SB}{2} - 2 \cdot GA \right] [B - (GA + TC)] \quad (4.18)$$

Ranura ovalada, devanado de doble capa:

$$AN = \left[\frac{ST+SB}{2} - 2 \cdot 6A \right] \left[B - \left(\frac{SB}{2} + 6A + TC \right) \right] + 1,57 \left(\frac{SB}{2} - 6A \right)^2 \quad (4.19)$$

Ranura ovalada, devanado de simple capa:

$$AN = \left[ST + \frac{SB}{2} - 2 \cdot GA \right] \left[B - \left(\frac{SB}{2} + TC \right) \right] + 1,57 \left(\frac{SB}{2} - GA \right)^2 \quad (4.20)$$

Si no se conocen el espesor de la cuña y del aislamiento, se pueden suponer los siguientes valores:

TC=0.3 a 0.35 mm, para aislamiento Clase B

TC= 0.5 mm para aislamiento Clase F, H

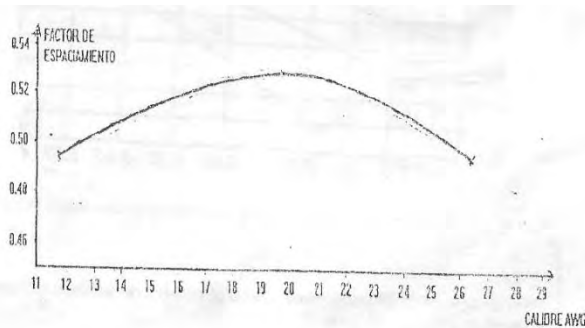
GA =0.2 a 0.25 mm, para aislamiento Clase B

GA = 0.4 mm, para aislamiento Clase F, H

Determinación del factor de espaciamento y cálculo del área del conductor.

Se muestra un ejemplo de los factores de espaciamento (tomado como la relación entre la sección del cobre desnudo al área neta da la ranura AN) para devanados de doble capa con conductores con recubrimiento de esmalte en ranuras trapezoidales (como la mostrada en la Figura 11. La característica en la Figura 12 se expresa en función del calibre del conductor, a partir de tablas convencionales.

Figura 12. Gráfico Factores de espaciamento para devanados de doble capa con conductores esmaltados en ranuras trapezoidales.



Fuente. Dr. PERCY VIEGO Felipe. Cálculo de devanados de motores asíncronos

Como se observa en la Figura 12, el factor de espaciamento se hace máximo en un punto (para este caso, con conductores de calibre AWG alrededor de 20 - 21) Y se reduce a partir de allí, tanto cuando se aumenta como cuando se reduce el calibre. Esto depende de dos factores contrapuestos: en el caso de los calibres más finos, la mayor relación entre el área del conductor aislado y la del conductor desnudo (el espesor del aislamiento no puede reducirse mucho); con calibres más gruesos, el mayor espacio libre que queda entre conductores.

Cuando la ranura es del tipo ovalado el factor de espaciamento se incrementa, puesto que esta forma permite mejor adaptación de los conductores redondos en la base. Es por ello que cuando se utiliza este tipo de ranuras se emplea un coeficiente que incrementa el factor de espaciamento. Un caso intermedio resulta cuando se construyen ranuras con los vértices redondos.

Conocido el número de conductores a colocar en la ranura, el área neta de ésta y el valor del factor de espaciamento en función del área de los conductores, es posible calcular, mediante un proceso de tanteo, la sección de los mismos. Para ello es necesario utilizar la expresión:

$$FE = NR.ACON / AN \quad (4.21)$$

Que define el factor de espaciamento, y suponer un valor cualquiera de éste, para determinar con ello el área del conductor. Multiplicando el área del conductor hallado por el número de conductores en la ranura y aplicando la expresión (4.21), con el factor de espaciamento supuesto, se calcula el área neta de la ranura. Esta debe ser igual a la obtenida como dato. Si esto último no se cumple, es necesario repetir iterativamente el proceso.

Cuando la capacidad nominal de los motores aumenta, pueden resultar de los cálculos conductores de más sección que la de un 17 o 18 AWG. Si es así, resulta imprescindible utilizar varios conductores en paralelo de un área equivalente, para lo cual se utiliza la Tabla 4 como punto de partida. Es decir que entonces en este caso hay que hacer los cálculos considerando que habrá un número mayor de conductores con menor sección.

Una vez obtenida el área adecuada del conductor, es necesario redondear a los valores normalizados que presentan las tablas comerciales como la tabla 4. Esto puede requerir comprobar de nuevo y repetir parte del proceso.

Como puede apreciarse, el método de tanteo descrito puede requerir muchas iteraciones, por lo que se utilizará aquí un procedimiento que resulta más rápido y que parte de la linealización de las curvas características de los factores de espaciamento, como los del ejemplo de la figura 12. Esto reduce en forma considerable el número de tanteos a realizar. Así, suponiendo que las características son lineales por zonas, se puede expresar:

$$FE = ACON.PEND + BINT \quad (4.22)$$

$$ACON = \frac{(BINT \times AN)}{(NR - PEND \times AN)}$$

En la Tabla 5 se dan los interceptas y pendientes de las diferentes características linealizadas, para ranuras trapezoidales, donde se han obtenido como máximo tres rectas de cada característica de factor de espaciamiento, El error cometido es despreciable. Si las ranuras son del tipo ovalado, a los valores interceptas se les debe sumar 0.05, para considerar así el incremento.

Cuadro 4. Características de conductores.

Calibre AWG	Diámetro desnudo mm	sección mm²
11	2.305	4.172
12	2.053	3.312
13	1.818	2.595
14	1.628	2.082
15	1.45	1.651
16	1.291	1.309
17	1.150	1.039
18	1.024	0.824
19	0.912	0.653
20	0.812	0.518
21	0.723	0.411
22	0.644	0.326
23	0.573	0.258
24	0.511	0.205
25	0.456	0.163
26	0.410	0.132
27	0.361	0.102
28	0.321	0.080
29	0.290	0.066
30	0.255	0.051
31	0.226	0.040
32	0.203	0.032
33	0.180	0.025
34	0.160	0.020
35	0.142	0.016

Fuente. Dr. PERCY VIEGO Felipe. Cálculo de devanados de motores asincrónicos

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, para determinar el área de conductores, se supone un valor para la pendiente y el intercepto correspondiente, sustituyéndolos en la expresión (4.23). Si el área del

conductor hallado no coincide con los límites expresados en la Tabla 5, se escoge otra pendiente e intercepto y así sucesivamente.

De esta forma, el número máximo de tanteos es igual a 3. Si el conductor hallado tiene un área mayor que la mínima recomendada, se deben utilizar conductores en paralelo o pasos en paralelo, hasta obtener un área dentro de los límites correspondientes. Con el área de conductor hallado, se puede obtener el calibre de dicho conductor, mediante Tabla 4.

Cuadro 5. Interceptas y pendientes para las características de factores de espaciamiento (ranuras trapezoidales).

Devanado	Aislamiento	Nº	Límites	PEND	BINT
Doble capa	Esmaltado	1,2,3	0.0645-0.32		
			0.32-1.62	0.1317	0.491
			1.62-4.12	-0.0155	0.539
				0.00775	0.527
Simple capa	Esmaltado	1,2,3	0.0645-0.29		
			0.29-1.61	0.168-	0.587
			1.61-4.19	0.0226-	0.641
				0.0369	0.612

Fuente. Cálculo de devanados de motores asíncronos Dr. Percy Viego Felipe.

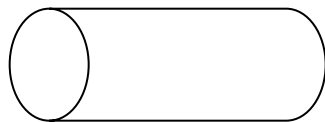
8. CÁLCULO DEVANADO MOTOR SIEMENS PARA 2 POLOS 3600 R.P.M

Figura 13. DATOS PLACA MOTOR SIEMENS 36 RANURAS

1 L A 3 095 – 6YC60	Voltaje =	220 V
1, 5 HP	Número de Polos =	6 Polos 1100 RPM
B6 090L / IP54	Frecuencia =	60 Hz
Form con IMB3	Aislamiento Clase=	F 155° C
IEC 34 Norma	Número de Ramas=	36

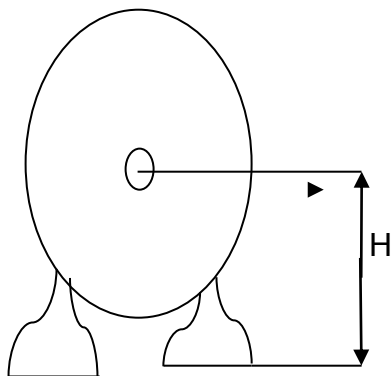
Figura 14. Longitud axial del motor siemens.

Longitud Axial del Núcleo DAX = 70.93 mm
 DAX Bloque Magnético



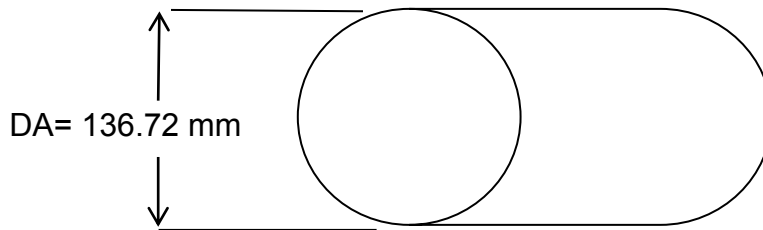
Ancho tras la rama DDR = 6.44 mm
 Ancho menor del Diente DMD = 4,09 mm

Figura 15. Altura del estator del motor siemens.



= 90.00 mm
 TABLA FABRICANTE

Figura 16. Diámetro exterior del estator siemens.



Diámetro exterior del estator	
DA =	136,72 mm
Voltaje =	220 V
Número de Polos	246
Frecuencia	60 H
Aislamiento Clase F	Clase F
Número de Ranuras	36
Longitud Axial del Núcleo	70.93 mm <u>DAX</u>
Ancho tras la ranura	DDR = 6.44 mm
Ancho menor del Diente	DMD = 4.09 mm
Altura del Eje	H= 90.00 mm
Diámetro exterior del estator	DA = 136,72 mm

El tipo de ranura es similar a la mostrada en la figura 13 con las siguientes dimensiones:

ST = 4.18 mm
SB = 5.97 mm
B = 13, 25 mm
TC = 1,73 mm
Ga = 0,21 mm

Determinación del flujo por polo:

$$DN = (DAX - VN - WV). KC$$

WV Y VN.

DN = 70.93. KC.

$DN = 68,802 \text{ mm}$

El ancho y el número de los conductos de verificación WV y VN.

KC = Es el factor de apilamiento, que puede ser tomado igual a 0.97

De (1,2) el área de la culata está dada por $ATR = DDR.DN$

$$ATR = 6,44 \text{ mm} \times 68,802 \text{ mm}.$$

$$ATR = 443,086 \text{ mm}^2$$

ATR = Ancho tras la ranura o culata longitud neta del núcleo.

De la Ecuación (1.3) se tiene el área de los dientes:

S= Número de ranuras

P = Número de Polos

$$ATD = DN.DMD. (S / P)$$

$$ATD = 68.80 \text{ mm} \times 4,09 \text{ mm} \times 36/2 \text{ polos}$$

$$ATD = 5065.05 \text{ mm}^2$$

De la tabla 1.1 se escoge BTH, se coge la altura del eje que es 90.00 mm cerrado con ventilación forzada (TEFC).

$$BTH = 1.4$$

Así del (1.4) el flujo por polo es:

FPP= Flujo por polo, la inducción en el entrehierro se distribuye sinusoidalmente por lo que el valor promedio estará dado por $2/\pi$ veces el valor máximo. Así el flujo por polo permisible se expresa por:

$$FPP = (BTH \otimes ATD) / 1.57$$

$$FPP = \frac{1.4 \times 5.06 \times 10^{-3} m^2}{1.57} = 0.004 \text{ Wb}$$

$$BCC = \frac{(0.5 \times 5.06 \times 10^{-3} m^2)}{0.0043} = 0.571 \text{ Teslas}$$

$$BCC = \frac{(0.5 \times FPP)}{ATR}$$

$$FPP = \frac{(5.71 \times 443.07)}{0.5} = 0.005 \text{ Wb}$$

El paso que se crea al generar el devanado es 1-18

Calculo del número de bobinas por grupo de polo.

$$Z = \frac{36}{3 \times 2} = 6 \text{ bobina / polo / a se}$$

Factor de Distribución:

β = Angulo eléctrico entre ranuras

$$\beta = 360^\circ \left(\frac{P}{2} \right) /$$

$$\beta = \frac{360}{36} = 10^\circ$$

Factor de distribución vale

$$FD = \frac{\text{sen} \left(\frac{Z}{B/2} \right)}{Z \cdot \text{Sen} \left(\frac{B}{2} \right)}$$

$$FD = \frac{\text{sen} (6 \times 10 / 2)}{6 \times \text{sen} (10 / 2)} = 0,96$$

FD: 0,96

8.1. FACTOR DE PASO PARA MAQUINAS DE 2 POLOS

$$FP = \text{Sen}(\alpha / 2)$$

$$FP = (Y \times (P / S)(180^\circ / 2))$$

$$FP = (0.58 \times (2 / 36)(180^\circ / 2)) = 0.050$$

Numero de Vueltas por fase

$$NF = \frac{VF}{KE \times 4.44 \times f \times FPP \times FD \times FP}$$

$$NF = \frac{220 / 1.3}{0.974 \times 4.44 \times 60 \times 0.004 \times 0.96 \times 0.050} = 2561$$

Ke = Relación de caída por impedancia. Relación entre DA diámetro exterior del núcleo y el # polos.

NF: 2561 espiras

Donde KE= 0,974

DA= 132,76 mm² y P= 2 polos

Numero de Vueltas por bobina

$$Nc = \frac{3NF}{S} = \frac{3NF}{5}$$

$$Nc = (3 \times 2561) / 36 = 213.41$$

214 Vueltas Por bobina

Recalcula

$$NF = \frac{214 \times 36}{3} = 2568$$

Número de bobinas por polo.

El paso que se crea al generar el devanado es 1-18

Cada grupo de cada fase posee un numero de bobinas igual a Z = 3 bobinas / polo / fase

8.1.1. Cálculo del calibre del conductor.

Número de conductores por ranura:

$$NR = 3NF/S$$

$$NR = 3 \times (2568) / 36 = 214 \text{ espiras por ranura}$$

✓ B) ÁREA NETA DE LA RANURA

✓ B Ranura Ovalada

$$AN = \left[\frac{ST + SB}{2} - 2 \cdot 6A \right] \left[B - \left(\frac{SB}{2} + 6A + TC \right) \right] + 1,57 \left(\frac{SB}{2} - 6A \right)^2$$

$$\begin{aligned} AN &= \left[\frac{(4,18mm) + (5,97mm)}{2} - 2(0,21mm) \right] \times \left[13,25 \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{5,97mm}{2} + (0,21mm) + (1,73mm) \right) \right] \\ &\quad + 1,57 \left(\frac{5,97mm}{2} - (0,21mm) \right)^2 \end{aligned}$$

$$AN = [5,075 - 0,420] \times [8,325] + 1,57 (7,701)^2$$

$$AN = 310,526 \text{ mm}^2$$

8.2. FACTOR DE ESPACIAMIENTO / CALIBRE DEL CONDUCTOR

$$PEND = 0.1317$$

$$BINT = 0.491$$

$$ACON = \frac{(BINT \times AN)}{(NR - PEND \times AN)}$$

$$ACON = \frac{0,491 \times 310,526}{60 - 0,1317 \times 310,526} = \frac{152,468}{18590,664}$$

$$ACON = 0,008 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{Calibre 35}$$

PEND	BINT
-0,0155	0,539

$$ACON = \left[\frac{(BINT \times AN)}{(NR - PEND \times AN)} \right]$$

$$ACON = \left[\frac{0,539 \times 310,526}{60 - (-0,0155) \times 310,526} \right]$$

$$ACON = 0,009$$

8.3. CÁLCULO DEVANADO MOTOR SIEMENS PARA 4 POLOS 1800 R.P.M

Determinación del flujo por polo

$$DN = (DAX - VN - WV). KC$$

WV Y VN.

$$DN = 70.93. KC$$

$$DN = 68,802 \text{ mm}$$

conductos de verificación WV y VN
 KC = Es el factor de apilamiento, que puede ser tomado igual a 0.97.

De (1,2) el área de la culata está dada por $ATR = DDR.DN$.

$$ATR = 6,44 \text{ mm} \times 68,802 \text{ mm}$$

$$ATR = 443,086 \text{ mm}^2$$

ATR = Ancho tras la ranura o culata longitud neta del núcleo.

De la Ecuación (1.3) se tiene el área de los dientes:

S= Número de ranuras

P = Número de Polos

$$ATD = DN.DMD. (S / P)$$

$$ATD = 68.80 \text{ mm} \times 4,09 \text{ mm} \times 36/4 \text{ polos}$$

$$ATD = 2532.52 \text{ mm}^2$$

De la tabla 1.1 se escoge BTH, se coge la altura del eje que es 90.00 mm cerrado con ventilación forzada (TEFC).

$$BTH = 1.4$$

Así del (1.4) el flujo por polo es:

FPP= Flujo por polo, la inducción en el entrehierro se distribuye sinusoidalmente por lo que el valor promedio estará dado por $2/\pi$ veces el valor máximo. Así el flujo por polo permisible se expresa por:

$$FPP = (BTH \otimes ATD)/1.57$$

$$FPP = \frac{1.4 \times 2.53 \times 10^{-3} m^2}{1.57} = 0.002 \text{ Wb}$$

$$BCC = \frac{(0.5 \times 2.53 \times 10^{-3} m^2)}{0.0043} = 0.285 \text{ Teslas}$$

$$BCC = \frac{(0.5 \times FPP)}{ATR}$$

$$FPP = \frac{(2.856 \times 443.07)}{0.5} = 0.002 \text{ Wb}$$

El paso que se crea al generar el devanado es 1-9.

Calculo del número de bobinas por grupo de polo.

$$Z = \frac{36}{3 \times 4} = 3 \text{ bobina / polo / a se}$$

Factor de Distribución

β = Angulo eléctrico entre ranuras

$$\beta = 360^\circ \left(\frac{P}{2} \right) /$$

$$\beta = \frac{360}{36} = 10^\circ$$

Factor de distribución vale

$$FD = \frac{\text{sen} \left(\frac{Z}{B/2} \right)}{Z \cdot \text{Sen} \left(\frac{B}{2} \right)}$$

$$FD = \frac{\text{sen} (3 \times 20/2)}{3 \times \text{sen} (20/2)} = 0,960$$

FD: 0,960

FACTOR DE PASO PARA MAQUINAS DE 4 POLOS

$$FP = \text{Sen}(\alpha / 2)$$

$$FP = (Y \times (P/S)(180^\circ / 2))$$

$$FP = (0.8 \times (4/36)(180^\circ / 2)) = 0.139$$

Numero de Vueltas por fase

$$NF = \frac{VF}{KE \times 4.44 \times f \times FPP \times FD \times FP}$$

$$NF = \frac{220 / 1.3}{0,952 \times 4,44 \times 60 \times 0,002 \text{ WB} \times 0,960 \times 0,139} = 1885.226$$

Ke = Relación de caída por impedancia. Relación entre DA diámetro exterior del núcleo y el # polos.

NF: 1885.226 espiras
 Donde KE= 0,952
 DA= 132,76 mm² y P= 4 polos

Numero de Vueltas por bobina.

$$Nc = \frac{3NF}{S} = \frac{3NF}{S}$$

$$Nc = (3 \times 1885.226) / 36 = 157.102$$

158 Vueltas Por bobina

Recalcula

$$NF = \frac{158 \times 36}{3} = 158$$

Número de bobinas por polo.

El paso que se crea al generar el devanado es 1-9

Cada grupo de cada fase posee un numero de bobinas igual a Z = 3 bobinas / polo / fase.

8.3.1. Cálculo del calibre del conductor. Número de conductores por ranura.

$$NR = \frac{3NF}{S}$$

$$NR = \frac{3 \times (2568)}{36} = 214 \text{ espiras por ranura}$$

- ✓ B) ÁREA NETA DE LA RANURA
- ✓ B Ranura Ovalada

$$AN = \left[\frac{ST + SB}{2} - 2 \cdot 6A \right] \left[B - \left(\frac{SB}{2} + 6A + TC \right) \right] + 1,57 \left(\frac{SB}{2} - 6A \right)^2$$

$$AN = \left[\frac{(4,18mm) + (5,97mm)}{2} - 2(0,21mm) \right] \times \left[13,25 - \left(\frac{5,97mm}{2} + (0,21mm) + (1,73mm) \right) \right] + 1,57 \left(\frac{5,97mm}{2} - (0,21mm) \right)^2$$

$$AN = [5,075 - 0,420] \times [8,325] + 1,57 (7,701)^2$$

$$AN = 310,526 \text{ mm}^2$$

8.4. FACTOR DE ESPACIAMIENTO / CALIBRE DEL CONDUCTOR

$$PEND = 0.1317$$

$$BINT = 0.491$$

$$ACON = \frac{(BINT \times AN)}{(NR - PEND \times AN)}$$

$$ACON = \frac{0,491 \times 310,526}{60 - 0,1317 \times 310,526} = \frac{152,468}{18590,664}$$

$$ACON = 0,008 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{Calibre 35}$$

PEND	BINT
-0,0155	0,539

$$ACON = \left[\frac{(BINT \times AN)}{(NR - PEND \times AN)} \right]$$

$$ACON = \left[\frac{0,539 \times 310,526}{60 - (-0,0155) \times 310,526} \right]$$

$$ACON = 0,009$$

8.5. CALCULO PARA MOTOR DE 6 POLOS 1200 RPM

Determinación del flujo por polo.

$$DN = (DAX - VN - WV). KC$$

WV Y VN.

$$DN = 70.93. KC.$$

DN = 68,802 mm

El ancho y el número de los conductos de verificación WV y VN.

KC = Es el factor de apilamiento, que puede ser tomado igual a 0.97.

De (1,2) el área de la culata está dada por $ATR = DDR.DN$

$$ATR = 6,44 \text{ mm} \times 68,802 \text{ mm}$$

$$ATR = 443,086 \text{ mm}^2$$

ATR = Ancho tras la ranura o culata longitud neta del núcleo.

De la Ecuación (1.3) se tiene el área de los dientes:

$$\begin{aligned} S &= \text{Número de ranuras} \\ P &= \text{Número de Polos} \end{aligned}$$

$$ATD = DN.DMD. (S / P)$$

$$ATD = 68.80 \text{ mm} \times 4,09 \text{ mm} \times 36/6 \text{ polos}$$

$$ATD = 1688.352 \text{ mm}^2$$

De la tabla 1.1 se escoge BTH, se coge la altura del eje que es 90.00 mm cerrado con ventilación forzada (TEFC).

$$BTH = 1.4$$

Así del (1.4) el flujo por polo es:

FPP= Flujo por polo, la inducción en el entrehierro se distribuye sinusoidalmente por lo que el valor promedio estará dado por $2/\pi$ veces el valor máximo. Así el flujo por polo permisible se expresa por:

$$FPP = (BTH \otimes ATD)/1.57$$

$$FPP = \frac{1.4 \times 1.68 \times 10^{-3} m^2}{1.57} = 0.001 \text{ Wb}$$

$$BCC = \frac{(0.5 \times 1.68 \times 10^{-3} m^2)}{0.0043 m^2} = 0.189 \text{ Teslas}$$

$$BCC = \frac{(0.5 \times FPP)}{ATR}$$

$$FPP = \frac{(1.89 \times 443.07)}{0.5} = 0.001 \text{ Wb}$$

El paso que se crea al generar el devanado es 1-6

8.5.1. Calculo del número de bobinas por grupo de polo.

$$Z = \frac{36}{3 \times 6} = 2 \text{ bobina / polo / a se}$$

Factor de Distribución

β = Angulo eléctrico entre ranuras

$$\beta = 360^\circ \left(\frac{P}{2} \right) /$$

$$\beta = \frac{360}{36} = 10^\circ$$

Factor de distribución vale

$$FD = \frac{\sin(Z/B/2)}{Z \cdot \sin(B/2)}$$

$$FD = \frac{\sin(2 \times 30/2)}{2 \times \sin(30/2)} = 0,965$$

FD: 0,965

8.6. FACTOR DE PASO PARA MAQUINAS DE 2 POLOS

$$FP = \sin(\alpha/2)$$

$$FP = (Y \times (P/S)(180^\circ/2))$$

$$FP = (0.86 \times (6/36)(180^\circ/2)) = 0.224$$

Numero de Vueltas por fase

$$NF = \frac{VF}{KE \times 4.44 \times f \times FPP \times FD \times FP}$$

$$NF = \frac{220 / 1.3}{0,94 \times 4,44 \times 60 \times 0.001 \times WB \times 0,965 \times 0,224} = 2357.29$$

Ke = Relación de caída por impedancia. Relación entre DA diámetro exterior del núcleo y el # polos.

NF: 2357.29 espiras

Donde KE= 0,94

DA= 132,76 mm² y P= 6 polos

Numero de Vueltas por bobina.

$$N_c = \frac{3NF}{S} = \frac{3NF}{S}$$

$$N_c = (3 \times 2357.29) / 36 = 196.44$$

197 Vueltas Por bobina

Recalcula

$$NF = \frac{197 \times 36}{3} = 197$$

Número de bobinas por polo.

El paso que se crea al generar el devanado es 1-6

Cada grupo de cada fase posee un numero de bobinas igual a Z = 2 bobinas / polo / fase.

8.6.1. Cálculo del calibre del conductor. Número de conductores por ranura.

$$NR = \frac{3NF}{S}$$

$$NR = \frac{3 \times (2357.29)}{36} = 197 \text{ espiras por ranura}$$

- ✓ B) ÁREA NETA DE LA RANURA
- ✓ B Ranura Ovalada

$$AN = \left[\frac{ST + SB}{2} - 2 \cdot 6A \right] \left[B - \left(\frac{SB}{2} + 6A + TC \right) \right] + 1,57 \left(\frac{SB}{2} - 6A \right)^2$$

$$AN = \left[\frac{(4,18mm) + (5,97m)}{2} - 2 (0,21mm) \right] \times \left[13,25 - \left(\frac{5,97mm}{2} + (0,21mm) + (1,73mm) \right) \right] + 1,57 \left(\frac{5,97mm}{2} - (0,21mm) \right)^2$$

$$AN = [5,075 - 0,420] \times [8,325] + 1,57 (7,701)^2$$

$$AN = 310,526 \text{ mm}^2$$

8.7. FACTOR DE ESPACIAMIENTO / CALIBRE DEL CONDUCTOR

$$PEND = 0.1317$$

$$BINT = 0.491$$

$$ACON = \frac{(BINT \times AN)}{(NR - PEND \times AN)}$$

$$ACON = \frac{0,491 \times 310,526}{60 - 0,1317 \times 310,526} = \frac{152,468}{18590,664}$$

$$ACON = 0,008 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{Calibre 35}$$

$$PEND \\ -0,0155$$

$$BINT \\ 0,539$$

$$ACON = \left[\frac{(BINT \times AN)}{(NR - PEND \times AN)} \right]$$

$$ACON = \left[\frac{0,539 \times 310,526}{60 - (-0.0155) \times 310,526} \right]$$

$$ACON = 0,009$$

9. IMPLEMENTACIÓN FINAL DEL MÓDULO DIDÁCTICO Y OPERATIVO PARA LA ELABORACIÓN DE ESQUEMAS DE DEVANADOS EN MÁQUINAS ROTATIVAS TRIFÁSICAS DE CORRIENTE ALTERNA

Luego de terminar los cálculos y acondicionar el motor Siemens en el módulo didáctico, instalando las bobinas en las ranuras del estator, se unió todos sus conductores al tablero de conexión del motor para luego conectarlo con el modulo didáctico.

Figura 17. Fotos bornero motor y modulo didáctico.



Se realizan los diferentes tipos de devanados imbricados de 2,4 y 6 polos en una y dos capas en la plataforma didáctica, con este procedimiento podemos verificar si los devanados calculados y dibujados en planos cumplen con las condiciones teóricas de devanados.

10. MANUAL DE LABORATORIO PARA LA PRÁCTICA DE DEVANADOS

10.1. COMPETENCIA ACADEMICA

Principio de funcionamiento de los motores asíncronos se fundamenta en la producción de campo magnético giratorio donde hacen parte vital los devanados por polos y por polos consecuentes, calculando dibujando y montando en un módulo didáctico y operativo para la elaboración de esquemas de devanados en máquinas rotativas trifásicas de corriente alterna.

10.2. ALCANCE

- ✓ Comprender los cálculos para los diferentes tipos de devanados de 2, 4, 6 polos.
- ✓ Diseñar y conectar los tipos de devanados de 2, 4, 6 polos en el módulo didáctico y operativo para la elaboración de esquemas de devanados en máquinas rotativas trifásicas de corriente alterna.

10.3. OBJETIVOS

- ✓ Comprender el principio de operación de las maquinas rotativas trifásicas de corriente alterna.
- ✓ Elaborar los esquemas de devanados de 2, 4, 6 polos de una y dos capas.

10.4. EQUIPOS A UTILIZAR

Módulo didáctico y operativo para la elaboración de esquemas de devanados en máquinas rotativas trifásicas de corriente alterna.

- ✓ Tacómetro.
- ✓ Voltímetro.
- ✓ Amperímetro.

- ✓ Pomona corta cantidad (60).
- ✓ Pomona larga cantidad (20).
- ✓ Fusibles de 15 Amperios (para el tablero).
- ✓ Cinta reflectora para el tacómetro.

10.5. FUNDAMENTOS TEORICOS

10.5.1. Principios de las maquinas eléctricas. Las máquinas eléctricas son el resultado de una aplicación inteligente de los principios del electromagnetismo y en particular de la ley de inducción de Faraday. Las máquinas eléctricas se caracterizan por tener circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados.

10.5.1.1. Motor. Que transforma la energía eléctrica en mecánica. La acción se desarrolla introduciendo una corriente en la máquina por medio de una fuente externa, que *interacciona con el campo produciendo un movimiento de la máquina; aparece* entonces una f.e.m. inducida que se opone a la corriente y por ello se denomina fuerza contra electromotriz. En consecuencia el motor necesita una energía eléctrica de entrada para producir la energía mecánica correspondiente.

10.6. DEFINICIONES PARA DEVANADOS DE CORRIENTE ALTERNA

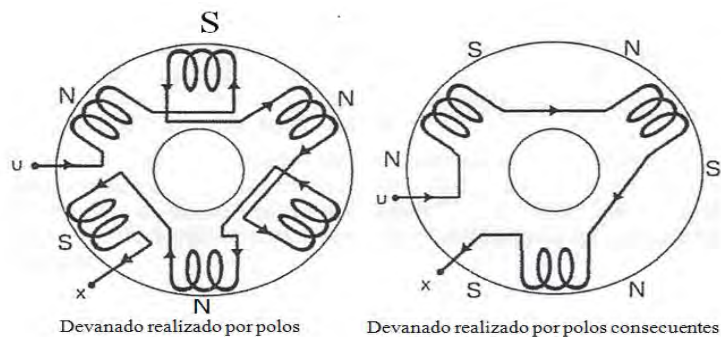
Cuando formamos un electroimán, por medio de una bobina y un núcleo de hierro, no tenemos que devanar la mitad de la bobina en un sentido y la otra mitad en otro o bien colocar dos bobinas devanadas en sentido contrario para formar sus dos polos, debido a que siempre que exista un polo norte consecuentemente ha de existir un polo sur, ya que nunca puede existir el uno sin el otro. Algo parecido sucede cuando se diseña el devanado de un motor, ya que se puede realizar con un grupo de bobinas para cada polo, tanto los norte como los sur, o bien conectar los grupos de bobinas para formar un solo tipo de polos, bien sean el norte o el sur, ya que, en este último caso, al formar una sola polaridad, consecuentemente se formará también la otra. Estos dos tipos de devanados se suelen emplear en corriente alterna, pudiéndose obtener así, para un mismo motor, los dos tipos de devanados relacionados a continuación.

- ✓ Devanados “por polos”
- ✓ Devanados “por polos consecuentes”

Como los devanados de corriente alterna pueden ser monofásicos o trifásicos y cada fase se forma generalmente por grupos de bobinas, conectadas entre sí de forma tal que el sentido de la corriente al recorrer sus lados activos vaya formando los distintos polos, podemos decir que:

- ✓ Un devanado está realizado por polos, cuando cada una de sus fases tiene tantos grupos de bobinas (G_f) como número de polos ($2p$) tiene la máquina.
- ✓ Un devanado está realizado por polos consecuentes, cuando cada una de sus fases está formada por tantos grupos de bobinas (G_f) como número de pares de polos (p) tiene la máquina.

Figura 18. Principio de ejecución de los devanados por polo y por polos consecuentes.



Principio de ejecución de los devanados "por polos" y "por polos consecuentes" representada una sola fase

Fuente. MARTÍNEZ DOMÍNGUEZ. Fernando Reparación y bobinado de Motores Eléctricos

10.7. GRUPOS DE BOBINAS POR FASE (G_f) Y NÚMERO TOTAL DE GRUPOS (G)

El número total de grupos de bobinas que ha de tener cada fase de un devanado (G_f), así como el número total de grupos de bobinas que hay que preparar para ejecutar todo el devanado (G), serán las siguientes:

- ✓ Para bobinas ejecutadas por polos

$$\text{Grupos por fase} = Gf = 2p$$

$$\text{Grupos totales} = G = 2p * m$$

- ✓ Para devanados ejecutados por polos consecuentes

$$\text{Grupos por fase} = Gf = p$$

$$\text{Grupos totales} = G = p * m$$

Siendo p = número de pares de polos; $2p$ = número total de polos y m = número de fases.

Se aprecia que los devanados ejecutados por polos llevan el doble de grupos de bobinas que los realizados por polos consecuentes; aunque para un mismo motor siempre ha de existir igual número de bobinas y espiras por fase.

10.8. NÚMERO DE RANURAS POR POLO Y FASE (K_{pq})

Tanto para los devanados ejecutados por polos como para los ejecutados por polos consecuentes, recibe este nombre el cociente que se obtiene al dividir el número total de ranuras de la armadura, por el producto entre el número de polos (p) de la máquina y su número de fases.

$$K_{pq} = \frac{K}{2p * q}$$

Cuando el devanado se realiza por polos, este valor ha de ser forzosamente un número entero y, si su valor es par, cada grupo tendrá el mismo número de bobinas, mientras que si dicho valor es impar, se debe recurrir bien sea: a realizar

grupos con distintos número de bobinas, o bien bobinas con distintos número de espiras.

Cuando el devanado se ha realizado por polos consecuentes, lo ideal sería que también el número de ranuras por polo y fase fuera un número entero, para que todos los grupos tuvieran el mismo número y tipo de bobinas. No obstante, para este tipo de ejecución se puede admitir que el número de ranuras por polo y fase sea un número entero más media unidad. En este último caso deben realizarse algunas bobinas con la mitad del número de espiras.

Cuadro 6. Numero de ranuras por polo y fase, para un motor trifásico

Numero de polos y ranuras de la armadura					numero de ranuras por polo y fase
2 polos	4 polos	6 polos	8 polos	10 polos	
6	12	18	24	30	1
12	24	36	48	60	2
18	36	54	72	90	3
24	48	72	96	120	4
30	60	90	120	150	5
36	72	108	144	180	6
42	84	126	168	210	7
48	96	144	192	240	8

10.9. NÚMERO TOTAL DE BOBINAS (B) Y DE BOBINAS POR GRUPO (Ug)

Los devanados de corriente alterna pueden ser ejecutados en una o dos capas por ranura, o lo que es lo mismo que cada bobina ocupe íntegramente dos ranuras completas o solamente dos mitades, superponiéndose en una misma ranura los lados activos de dos ranuras distintas por tanto, según cuál sea el tipo de ejecución, el número de bobinas que se requieren para su ejecución será distinto, a saber:

- ✓ Devanados de dos capas: $B = K$
- ✓ Devanados de una capa: $B = K/2$

Siendo K el número de ranuras de la armadura y B el número total de bobinas.

Una vez determinado el número total de bobinas requeridas y el número de grupos de bobinas que ha de tener un devanado, ya que se puede determinar fácilmente el número de bobinas que ha de tener cada grupo.

$$Ug = \frac{B}{G}$$

En la práctica es más útil expresarlo según el número de ranuras de la armadura: por tanto, en función del tipo de devanado que se va a realizar tendremos:

✓ Devanados ejecutados por polos

✓ De dos capas:

$$\circ Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{2p*q}$$

✓ De una capa:

$$\circ Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{4p*q}$$

✓ Devanados ejecutados por polos consecuentes

✓ De dos capas:

$$\circ Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{p*q}$$

✓ De una capa:

$$\circ Ug = \frac{B}{G} = \frac{K}{2p*q}$$

10.9.1. Procedimiento

- ✓ Mida la tensión AC en el banco de prueba verifique 220 voltios trifásicos.
- ✓ Cada ranura está identificada desde la ranura número uno hasta la ranura número 36 cada ranura tiene un principio y un final, el principio es de color negro y el final es de color rojo.
- ✓ Unir los finales o principios según sea el número de polos e identificar los terminales de cada fase que se conectan a las líneas L1, L2, L3 de la mesa de prueba.
- ✓ Mida la resistencia entre devanados al finalizar el conexionado.
- ✓ Verifique las R.P.M calculadas con las medidas en el eje de la máquina.

10.9.1.1. Trabajo de laboratorio:

- ✓ Cerrar las conexiones en delta o estrella para una tensión de 220 voltios.
- ✓ Comparar los datos calculados con los datos medidos con un tacómetro en el eje del motor.
- ✓ Presentar un reporte de lo realizado en el laboratorio según NTC 1486.

11. CONCLUSIONES

El conocimiento del factor de devanado es esencial a la hora de proyectar el devanado de una máquina permitiendo las secciones del conductor más adecuadas de cara a conseguir un diseño óptimo. Un error en el cálculo, dará lugar entre otros, a un desvío en la corriente de vacío para el caso del motor.

El rediseño de la máquina está orientado a la elaboración e implementación de esquemas de devanado.

El rediseño se implementó en una máquina donde se pueden implementar devanados trifásicos imbricados de paso entero de 2, 4, 6 polos.

El proceso de diseño no está enfocado a las pruebas bajo carga de inducción por el contrario se enfocó en la probabilidad de elaborar esquemas de devanados para diferentes números de polos cuya validación se realiza mediante la medición en el eje de la máquina.

Una máquina de confección normal se puede implementar realizando un diseño teórico y montando en la práctica un motor con todas sus bobinas de manera independiente teniendo la posibilidad de conectar de diferentes maneras según sea el número de polos, directamente proporcional con las R.P.M.

El método implementado aplica para cualquier tipo y tamaño de máquina de inducción sin embargo de acuerdo a lo encontrado la mayoría de máquinas eléctricas comerciales son de 36 ranuras, lo que dificulta la implementación de un número mayor de devanados.

BIBLIOGRAFÍA

CORRALES MARTIN, Juan. Cálculo industrial de máquinas Eléctricas.1982.

-----Cálculo modular de máquinas eléctricas.1907.2000.
Clasificación 21.

PERCY VIEGO, Felipe. Curso internacional en cálculo de devanados de motores asincrónicos. 1998. Ed. Facultad de ingeniería universidad del Valle.

DAWES, Chester L. Tratado de electricidad 2 Corriente Alterna. 2 Ed. Gustavo Gili, S.A, Barcelona, España.

FRAILE MORA, Jesús. Máquinas eléctricas. 2008. 6 Ed. Mc GRAW – HILL/ Interamericana de España, S.A.U.

GOURISHANKAR, Vembu. Conversión de Energía Electromecánica.1965.Ed Consultor Robert F. Lambert.

MARTÍNEZ DOMÍNGUEZ, Fernando. Reparación y bobinado de Motores Eléctricos. International Thomson Editores.España: 2001

M.P Kostenko, L.M Piotrovski. Máquinas eléctricas Tomo 2. Ed. Mir Moscú.

N.M. Perelmuter. Manual del electricista en trabajos de devanados y aislamiento Ed. Mir Moscú, URSS: 1983.

ROSENBERG, Robert. Reparación de motores eléctricos tomo 1 y tomo 2. 7 Ed. Gustavo Gili, S.A.

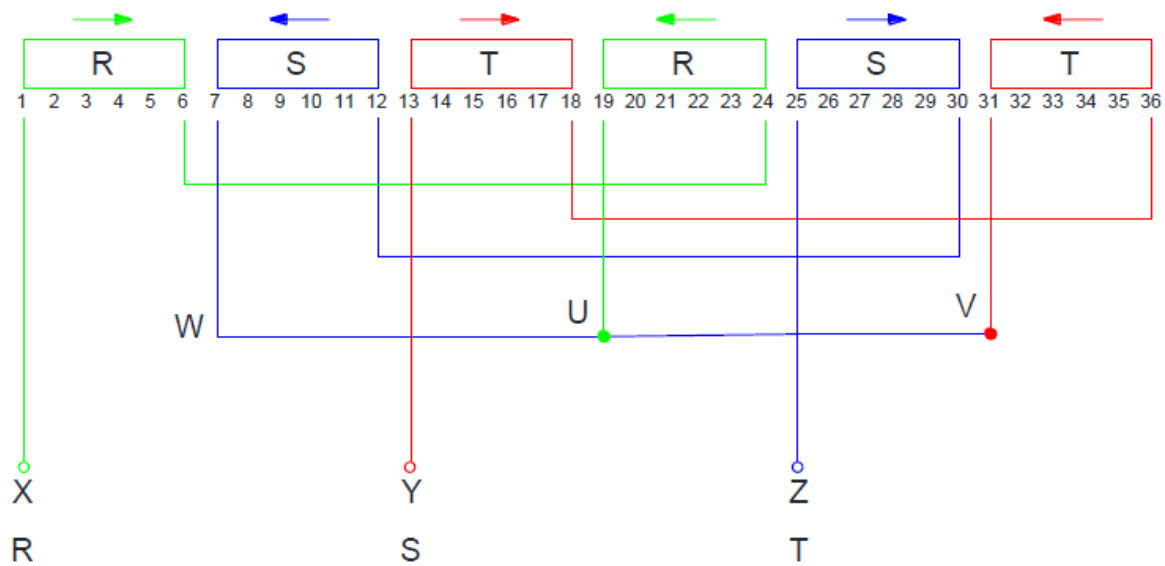
SENA. Curso de aprendizaje electricista instalador y de mantenimiento.1963. 2 Ed.

CHAPMAN. Stephen J. "Máquinas Eléctricas". McGraw-Hill. Colombia 1.987

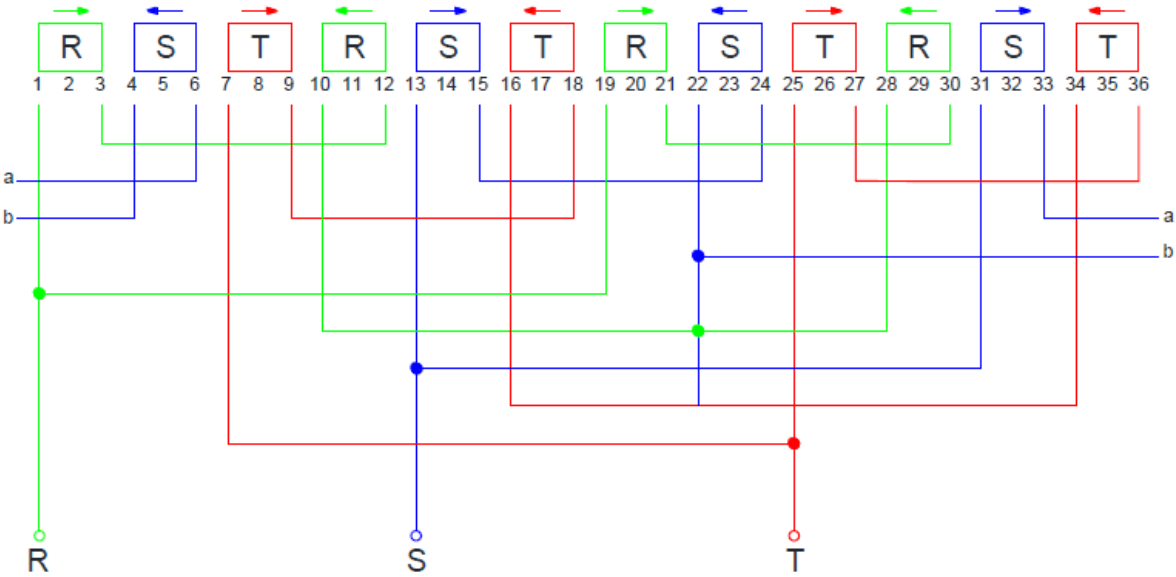
RAMÍREZ VÁZQUEZ, José. 101 esquemas de bobinados de corriente alterna. Ed. Ediciones Ceac / Perú, 164 / Barcelona.

ANEXOS

Anexo. Plano A 2.



Anexo. Plano B 4.



Anexo. Plano C 6.

